孙克军　主编
安国庆　梁永春　副主编

电机绕组图的绘制与识读

化学工业出版社

电机绕组图的绘制与识读

本书介绍了电机绕组的分类和各类电机绕组的常用术语，以及各种常用电机绕组展开图、定子绕组端部布线图、定子绕组接线圆图的构成原则、绕组特点、计算方法、绘制步骤、注意事项和识读技巧。主要内容包括电机绕组的基础知识、三相交流异步电机定子绕组展开图、三相异步电机定子绕组端部布线图、三相异步电机定子绕组接线圆图 、变极多速三相异步电机定子绕组图、单相异步电机定子绕组展开图、直流电机电枢绕组展开图等。

本书列举了大量电机绕组绘制和识读的实例，按步骤讲解，通俗易懂，清晰明了，便于读者迅速理解和掌握。

本书可供从事电机制造与电机修理的有关技术人员使用，也可作为高等职业院校及专科学校有关专业师生的教学参考书，还可作为电机维修人员培训用参考书。

ISBN 978-7-122-13422-6

9 787122 134226 >

www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

销售分类建议：电工

定价：38.00元

孙克军　主编
安国庆　梁永春　副主编

电机绕组图的绘制与识读

化学工业出版社
北京

图书在版编目（CIP）数据

电机绕组图的绘制与识读/孙克军主编. —北京：化学工业出版社，2012.4
ISBN 978-7-122-13422-6

Ⅰ.电… Ⅱ.孙… Ⅲ.①电机-绕组-制图②电机-绕组-图集-识别 Ⅳ.TM303.1-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 019263 号

责任编辑：高墨荣　　装帧设计：刘丽华
责任校对：徐贞珍

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号　邮政编码 100011）
印　　刷：北京云浩印刷有限责任公司
装　　订：三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm　1/16　印张 11¼　字数 238 千字　　2012 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）　售后服务：010-64518899
网　　址：http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定　　价：38.00 元

版权所有　违者必究

前言

随着国民经济的飞速发展，电机在工农业生产、军事、科技及人民日常生活中的应用越来越广泛。各行各业对电机的需求越来越多，从事电机制造、使用与维修的技术人员不断涌现，新知识也需要不断补充。

本书是根据广大电机制造与修理人员的实际需要而编写的。书中不仅介绍了电机绕组的分类和各类电机绕组的常用技术术语，以及有关计算方法和实例，而且还介绍了各种常用电机绕组展开图、定子绕组端部布线图、定子绕组接线圆图的构成原则、绕组特点、绕组绘制的方法步骤、注意事项以及绕组识读技巧。以帮助电机制造与修理人员提高电机绕组的理论水平，并掌握电机绕组绘制与识读的能力。

在编写过程中，从当前电机制造与修理的实际情况出发，面向生产实际，搜集、查阅了大量有关资料，归纳了大量有代表性的实例，详尽介绍了三相异步电机单层链式绕组、单层同心式绕组、单层交叉式绕组、双层叠绕组的展开图、端部布线图、接线圆图的绘制方法与识读技巧。还重点介绍了变极多速电机绕组、单相正弦绕组的绘制方法。并简要介绍了直流电机的单叠绕组、单波绕组、复叠绕组、复波绕组的绘制方法与特点。编写时考虑到了系统性，力求突出实用性，努力做到理论联系实际。

本书是突出了简明实用、通俗易懂、可操作强的特点。书中列举了大量的实例，简要、直观地介绍了电机绕组制造与修理的基础知识和基本操作技能。本书不仅适用于广大从事电机制造与修理的技术人员，还可作为农村进城务工人员，以及没有相应技能基础的广大城乡待业、下岗人员的就业培训用书，也可作为职业院校有关专业师生的教学参考书。

本书由孙克军主编，安国庆、梁永春副主编。第 1 章由贾红编写，第 2 章及附录由孙克军编写，第 3 章由李争编写，第 4 章由梁永春编写，第 5 章由赫苏敏编写，第 6 章由安国庆编写，第 7 章由于静编写。编者对关心本书出版、热心提出建议和提供资料的单位和个人在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不妥之处，希望广大读者批评指正。

编　者

目录

第1章
电机绕组的基础知识

1.1 交流电机绕组的基础知识 / 3
1.1.1 交流绕组的常用名词术语 / 3
1.1.2 交流电机绕组的分类 / 6
1.2 直流电机绕组的基础知识 / 9
1.2.1 直流绕组的常用名词术语 / 9
1.2.2 直流电机绕组的分类 / 12
1.3 对绕组的技术要求 / 13

第2章
三相交流异步电机定子绕组展开图

2.1 交流绕组的基本要求 / 17
2.2 利用槽电动势星形图绘制三相交流电机定子绕组展开图 / 17
2.2.1 交流电机定子绕组槽电动势星形图的绘制 / 17
2.2.2 绘制三相交流电机定子绕组展开图的步骤 / 20
2.2.3 三相双层叠绕组展开图的绘制 / 20
2.2.4 三相双层波绕组展开图的绘制 / 25
2.2.5 三相单层等元件绕组展开图的绘制 / 29
2.2.6 三相单层交叉式绕组展开图的绘制 / 31
2.2.7 三相单层链式绕组展开图的绘制 / 33
2.2.8 三相单层同心式绕组展开图的绘制 / 37
2.2.9 三相单双层混合绕组展开图的绘制 / 43

2.3 利用三相电流的正方向绘制定子绕组展开图 / 45
2.3.1 三相电流的正方向 / 45
2.3.2 利用电流的正方向绘制绕组展开图的方法步骤 / 47
2.3.3 三相单层链式绕组展开图的绘制 / 49
2.3.4 三相单层同心式绕组展开图的绘制 / 53
2.3.5 三相单层交叉式绕组展开图的绘制 / 55
2.3.6 三相双层叠绕组展开图的绘制 / 58
2.4 三相异步电机定子绕组展开图识读实例 / 61
2.4.1 三相异步电机定子绕组展开图识读方法步骤 / 61
2.4.2 三相异步电机常用定子绕组展开图识读实例 / 63

第3章
三相异步电机定子绕组端部布线图

3.1 定子绕组端部布线图的特点和绘制方法 / 71
3.1.1 定子绕组端部布线图的特点 / 71
3.1.2 定子绕组端部布线图的绘制方法 / 71
3.2 三相单层绕组端部布线图的绘制 / 74
3.2.1 三相单层链式绕组端部布线图的绘制 / 74
3.2.2 三相单层同心式绕组端部布线图的绘制 / 77
3.2.3 三相单层交叉式绕组端部布线图的绘制 / 79
3.3 三相双层叠绕组端部布线图的绘制 / 83
3.4 三相异步电机常用定子绕组端部布线图实例 / 86

第4章
三相异步电机定子绕组接线圆图

4.1 定子绕组接线圆图的特点和绘制方法 / 91
4.1.1 定子绕组接线圆图的特点 / 91
4.1.2 定子绕组接线圆图的绘制方法 / 91
4.1.3 定子绕组接线圆图的连接规律 / 93
4.2 常用定子绕组接线圆图的绘制实例 / 94
4.2.1 三相双层叠绕组接线圆图的绘制 / 94
4.2.2 三相单层交叉式绕组接线圆图的绘制 / 97

4.2.3 三相单层链式绕组接线圆图的绘制 / 100
4.2.4 三相单层同心式绕组接线圆图的绘制 / 102
4.3 三相异步电机定子绕组接线圆图识读实例 / 103
4.3.1 定子绕组接线圆图识读的方法步骤 / 103
4.3.2 定子绕组接线圆图识读实例 / 105

第5章
变极多速三相异步电机定子绕组图

5.1 变极多速三相异步电机的特点和分类 / 113
5.1.1 变极多速三相异步电机的特点 / 113
5.1.2 变极多速三相异步电机的分类 / 113
5.1.3 变极多速三相异步电机的变极方法 / 113
5.2 反向变极法 / 114
5.2.1 反向变极法的特点 / 114
5.2.2 反向变极的原理 / 114
5.3 换相变极法 / 117
5.4 不同节距变极法 / 117
5.4.1 不同节距变极法的特点 / 117
5.4.2 不同节距变极的原理 / 117
5.5 变极多速三相异步电机三相绕组的联结 / 120
5.5.1 单绕组双速电机 2Y/△联结 / 120
5.5.2 单绕组双速电机 2Y/Y联结 / 121
5.6 变极多速三相异步电机绕组图实例 / 121
5.6.1 反向变极的绕组图 / 121
5.6.2 不同节距变极的绕组图 / 127

第6章
单相异步电机定子绕组展开图

6.1 单相异步电机的同心式绕组 / 131
6.2 单相异步电机的正弦绕组 / 131
6.2.1 正弦绕组的构成 / 131
6.2.2 正弦绕组的种类及各槽内导体的分配 / 132

6.2.3 单相正弦绕组展开图的绘制 / 135
6.2.4 单相正弦绕组展开图实例 / 136
6.3 单相异步电机的罩极式绕组展开图 / 139

第7章
直流电机电枢绕组展开图

7.1 直流电机电枢绕组的分类 / 143
7.2 叠绕组展开图的绘制 / 143
7.2.1 叠绕组的特点 / 143
7.2.2 叠绕组展开图绘制的方法步骤 / 143
7.2.3 单叠绕组展开图的绘制 / 145
7.2.4 复叠绕组展开图的绘制 / 148
7.3 波绕组展开图的绘制 / 149
7.3.1 波绕组的特点 / 149
7.3.2 波绕组展开图绘制的方法步骤 / 150
7.3.3 单波绕组展开图的绘制 / 151
7.3.4 复波绕组展开图的绘制 / 154
7.4 换向极与换向极绕组 / 155
7.5 补偿绕组 / 156
7.6 直流电机常用电枢绕组展开图实例 / 157

附录
电机绕组绝缘结构及绝缘规范

1. 交流电机绕组的绝缘结构及绝缘规范 / 161
2. 直流电机绕组的绝缘结构及绝缘规范 / 163
3. 变频调速异步电机加强绝缘的措施 / 164
4. 井用潜水电机定子绕组的绝缘结构 / 165

参考文献 / 167

电机绕组的基础知识

1.1 交流电机绕组的基础知识 / 3
1.2 直流电机绕组的基础知识 / 9
1.3 对绕组的技术要求 / 13

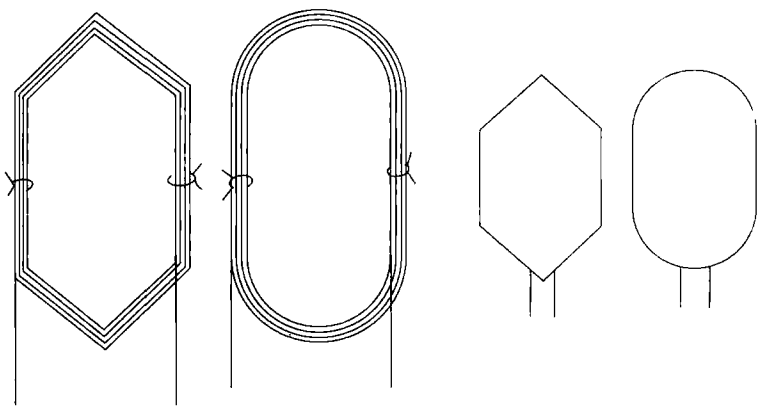
1.1 交流电机绕组的基础知识

1.1.1 交流绕组的常用名词术语

绕组是电机的主要部件之一。交流电机定子绕组常用名词术语如下。

（1）线圈

线圈是构成绕组的最基本单元，所以也称为绕组元件。线圈可能由一匝电磁线绕成，也可能由多匝电磁线绕成。常见的线圈有菱形（又称梭形）线圈和弧形（又称半圆形）线圈。常用线圈及其简化画法如图 1-1 所示。



(a) 菱形线圈　　(b) 弧形线圈　　(c) 多匝线圈简化画法

图 1-1　常用线圈及其简化画法

（2）线圈组

由多个线圈按一定方法组成一组，称为线圈组。

（3）绕组

由多个线圈或线圈组按照一定规律连接在一起就形成了绕组。

（4）有效边

每个线圈都有两个直线边，这两条直线边分别嵌入铁芯槽内，电磁量转换主要通过嵌入铁芯槽内的直线部分进行，故称它为有效边。

（5）端部

两个有效边之间的连线称为端部，仅起到把有效边连接起来的作用。

（6）电角度

计量电磁关系的角度单位称为电气角度，简称电角度。电机圆周在几何上占有角度为360°，称为机械角度。而从电磁方面看，对于一个按一定周期变化的物理量（磁动势、电动势、电压或电流等）完成一个交变周期，其相位即变化了360°（2πrad）。我们把这种无形的角度称为电角度。因此，一对磁极占有空间电角度360°。而对于4极（磁极对数 $p=2$）电机，其电角度为机械角度的两倍。一般而言，对于 p 对极电机，其电角度为机械角度的 p 倍，即

$$\text{电角度}=p\times\text{机械角度}$$

（7）槽距角

定子相邻两槽之间的距离以电角度表示时，称为槽距电角，简称槽距角，用 α 表示。其计算式为

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}$$

式中 Z_1 ——定子槽数。

（8）极距

每个磁极在定子铁芯的内圆上所占的范围称为极距，用 τ 表示。极距可以用槽数、对应的圆弧长度或电角度表示。即

$$\tau=180^\circ \text{或} \quad \tau=\frac{\pi D_{i1}}{2p} \quad \text{或} \quad \tau=\frac{Z_1}{2p}$$

式中 Z_1 ——定子槽数；

D_{i1} ——定子铁芯内径。

（9）线圈节距

一个线圈的两个有效边在定子铁芯内圆周所跨的距离称为节距，用 y 表示。节距可以用槽数或对应的圆弧长度表示，它有整距、短距和长距之分：

① $y=\tau$ 时为整距线圈，它可以产生最大的感应电动势；

② $y<\tau$ 时为短距线圈，它可以缩短线圈端部连线，节省导线，改善电机的性能；

③ $y>\tau$ 时为长距线圈，浪费导线，只在特殊电机（如单绕组变极多速异步电机）中采用。

节距（又称跨距）有两种表示形式，例如用槽数表示节距时，若 $y=8$，可表示为 $y=1$—9；同理，若 $y=9$，可表示为 $y=1-10$。

当在一台电机中使用不同节距的线圈时，可用 y_1、y_2、y_3 等加下角标的方法区分。

（10）每极每相槽数

每个磁极下面每相绕组所占的槽数称为每极每相槽数，用 q 表示，对于60°相带绕组，每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}$$

而对于120°相带绕组，则每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{pm}$$

式中 Z_1——定子槽数；

p——极对数；

m——相数，对于三相异步电机，$m=3$，对于单相异步电机，$m=2$。

（11）相带

为了使异步电机的定子绕组对称，通常令每个磁极下的每相绕组所占的范围相等，这个范围称为相带。

对于三相异步电机。由于一个磁极相当于180°电角度，分配到三相，则每相的相带为60°电角度，按60°相带排列的绕组称为60°相带绕组。三相异步电机还有一种划分相带的方法，即将每一对磁极分为三个等分，则每相占120°电角度，也可以得到三相对称绕组。按120°相带排列的绕组称为120°相带绕组。由于60°相带绕组的合成电动势比120°相带绕组的合成电动势大，故除了单绕组变极多速异步电机外，一般都采用60°相带绕组。

（12）极相组

将一个磁极下属于同一相（即一个相带）的 q 个线圈，按照一定方式串联成一组，称为极相组。

（13）并联支路数

每相绕组中包含若干个线圈组（或极相组），这些线圈组可以按一定的方式连接（如串联、并联等），每相绕组能够并联所形成的支路数，称为并联支路数，用 a 表示（若每相绕组中的全部线圈组串联成一条支路时，则称并联支路数为1，即 $a=1$），并联时要求每条支路的匝数和线径（即电磁线截面积）均应相同，即要求每条支路的阻抗相同，否则易造成环流，并导致电机绕组发热。

（14）每相绕组的串联匝数

一般将每相绕组中一条支路的匝数称为每相绕组的串联匝数。

（15）对称三相绕组

三相交流电机中，三相绕组的每相串联匝数及线径均相同（即三相绕组的阻抗均相同），相与相之间在空间分别间隔120°电角度的三相绕组，称为对称三相绕组。

（16）三相绕组首末端的标注方法

三相绕组的首端一般用A、B、C（或U1、V1、W1）表示；三相绕组的末端一般用X、Y、Z（或U2、V2、W2）表示。

【例1-1】 一台三相异步电机，定子槽数为48，极数 $2p=8$，求该电机的极距。

解

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{48}{8}=6$$

【例1-2】 一台三相异步电机，定子槽数为24，极数 $2p=4$，采用双层叠绕组，取节距 $y=\frac{5}{6}\tau$，求该电机的极距、节距、每极每相槽数及槽距角。

解 （1）极距 $\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{24}{4}=6$

（2）节距 $y=\frac{5}{6}\tau=\frac{5}{6}\times6=5$

（3）每极每相槽数 $q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{24}{4\times3}=2$

（4）槽距角 $\alpha=\frac{p\times360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times360^\circ}{24}=30^\circ$

1.1.2 交流电机绕组的分类

1.1.2.1 按定子绕组的形状与嵌装方式分类

三相异步电机定子绕组在定子铁芯槽内嵌放的形式是多种多样的，一般有以下的分类方法。

① 按定子铁芯槽内线圈有效边层数分类，有单层绕组、双层绕组和单双混合绕组三种。

② 按每极每相槽数 q 分类，有整数槽绕组（q 为整数）和分数槽绕组（q 为分数）两种。

③ 按线圈形状和端部连接方式分类，双层绕组又可分为叠式绕组和波式绕组等；单层绕组又可分为同心式绕组、链式绕组和交叉式绕组等。

④ 按相带分类，有 60°相带绕组、120°相带绕组等。

三相异步电机定子绕组的分类、结构特点及应用范围见表 1-1。

表 1-1 三相异步电机定子绕组的分类、结构特点及应用范围

分类		结构特征	应用范围	优缺点
单层同心式	单层两平面同心式	一个线圈内套另一个小线圈，绕组端部分成两个平面	用于 2、4 极，功率在 30kW 以下的较小容量电机中	优点：嵌线方便，节铜，不易击穿 缺点：磁动势波形不够好，谐波分量较大
	单层三平面同心式	一个线圈内套一个小线圈，绕组端部分成三个平面		
单层链式		各线圈都为同一个节距	应用于 $q=2$ 的 4、6、8 极较小功率电机中	
单层交叉式		两组绕组节距不等，且一组为偶数，一组为奇数，线模尺寸不同	应用于 $q=3$、5、7 的 2、4、6 极较小功率电机中	
整数槽双层绕组		每极每相槽数等于整数。每个槽内的绕组都分两层，其间用绝缘材料隔开	应用于容量较大的电机中（一般为中心高 160mm 及以上的电机）	优点：磁动势波形好，谐波小，损耗低、启动及运行性能都较好 缺点：嵌线工时较长
分数槽双层绕组		每极每相槽数不为整数。每个槽内的绕组分两层，之间用绝缘材料隔开		
单双层绕组		有的槽内为双层，有的槽内为单层，混合使用	一般用于 45kW 以下的小型电机中	兼有单层、双层优点并克服上述两者缺点

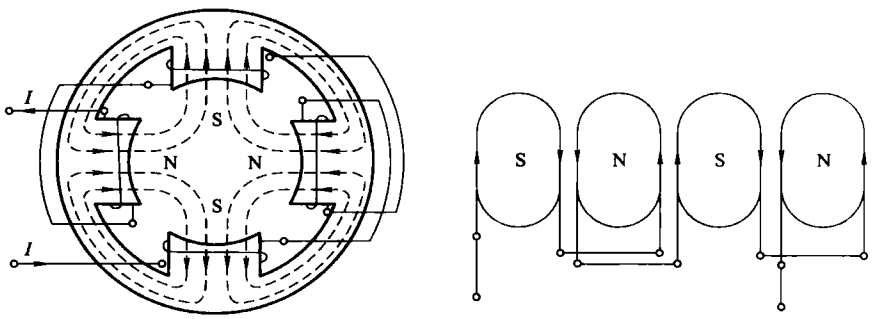
1.1.2.2 按定子绕组形成的磁极数分类

根据电机的磁极数与绕组分布形式产生不同磁极数的关系，定子绕组可分为显极式与庶极式两种类型。

（1）显极式绕组

每个线圈组形成一个磁极的绕组，一般称为显极式绕组。在显极式绕组中，每相绕组的线圈组数与电机的磁极数相等，为使磁极的极性 N 和 S 交替排列，每相相邻的两个线圈组中的电流方向必须相反，即每相相邻的两个线圈组的连接方式必须是反接串联，即常称为“头接头”、“尾接尾”。

图 1-2 为具有四个凸极的显极式绕组示意图。除凸极式单相罩极异步电机及直流电机外，一般电机都没有凸出的磁极，本图采用示意画法，以便较形象地说明问题。

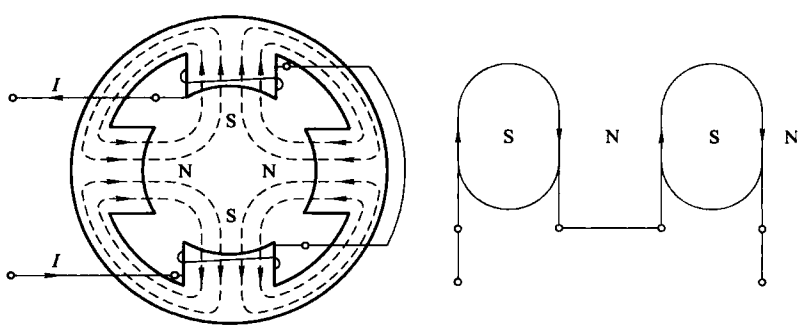


(a) 结构图　　(b) 接线图

图 1-2 显极式绕组示意图

（2）庶极式绕组

每个线圈组形成一对磁极的绕组，一般称为庶极式绕组（或称为隐极式绕组）。在庶极式绕组中，每相绕组的线圈组数为电机的磁极数的一半，因为另半数磁极由线

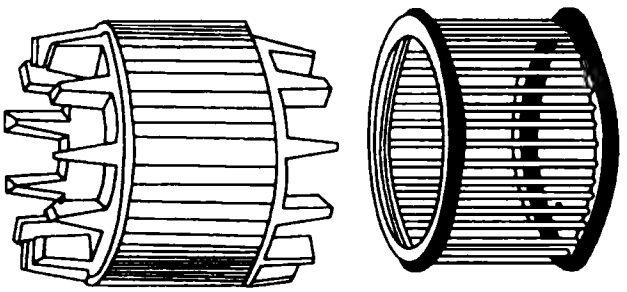


(a) 结构图　　(b) 接线图

图 1-3 庶极式绕组示意图

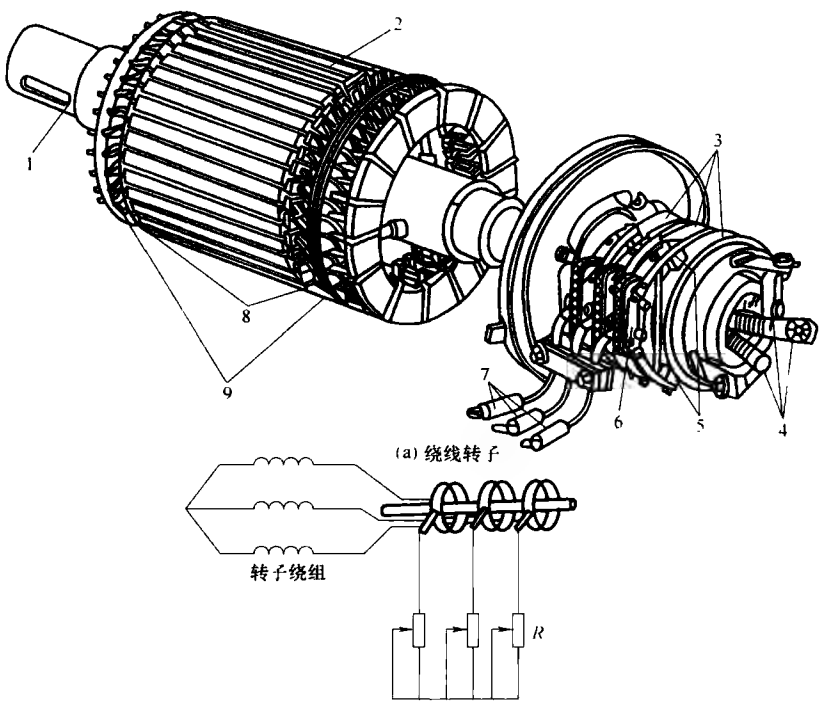
圈组产生的磁通共同形成，如图 1-3 所示。

在庶极式绕组中，每相绕组中的各个线圈组所形成的磁极的极性都相同，因而各个线圈组中的电流方向都相同，即每相相邻的两个线圈组的连接方式必须是顺接串联，即常称为“尾接头”。



(a) 铸铝绕组　　(b) 铜条绕组

图 1-4　笼型转子绕组



(a) 绕线转子

(b) 绕线转子与外接变阻器R的连接

图 1-5　绕线型转子绕组

1　转轴；2　转子铁芯；3　集电环；4—转子绕组引出线头；5　电刷；6　刷架；7　电刷外接线；8　三相转子绕组；9　镀锌钢丝箍

1.1.2.3 转子绕组的分类

转子绕组分为笼型和绕线型两种。

(1) 笼型转子绕组

该绕组是由插入每个转子铁芯槽中的裸导条与两端的环形端环连接组成。如果去掉铁芯，整个绕组就像一只笼子，故称为笼型转子绕组，如图 1-4 所示。中小型异步电机的笼型转子绕组，一般都用熔化的铝液浇入转子铁芯槽中，并将两个端环与冷却用的风扇翼浇注在一起，如图 1-4 (a) 所示。对于容量较大的异步电机，由于铸铝质量不易保证，常用铜条插入转子槽中，再在两端焊上端环，如图 1-4 (b) 所示。

(2) 绕线型转子绕组

绕线型转子绕组与定子绕组相似，也是把绝缘导线嵌入槽内，接成三相对称绕组，一般采用星形 (Y) 连接，三根引出线通过转轴内孔分别接到固定在转轴上的三个铜制的互相绝缘的集电环 (俗称滑环) 上，转子绕组可以通过集电环和电刷与外接变阻器相连，用以改善电机的启动性能或调节电机的转速。绕线转子如图 1-5 (a) 所示。绕线转子绕组与外加变阻器的连接，如图 1-5 (b) 所示。

直流电机绕组的基础知识

1.2.1 直流绕组的常用名词术语

直流电机电枢绕组的有关术语如下。

(1) 元件

元件指两端分别与两个换向片连接的单匝或多匝线圈。

(2) 元件边

元件在槽内的放置，如图 1-6 所示。每一个元件有两个放在槽中能切割磁通、感应电动势的有效边，称为元件边。每个元件的两个元件边嵌在电枢的不同槽内，放在槽下层的有效边称为下层元件边，画绕组展开图时，用虚线表示；放在槽上层的有效边称为上层元件边，画绕组展开图时用实线表示。

(3) 实槽与虚槽

为了改善电机的性能，往往希望用较多的元件来组成电枢绕组。但是，由于工艺等原因，电枢铁芯有时不便开太多的槽，故只能在每个槽的上、下层各放置若干个元件边，如图 1-7 所示。这时，为了确切说明每一个元件所处的具体位置，引入了“虚槽”的概念。设槽内每层有 u 各元件边，则把每一个实际的槽看作包含 u 个“虚槽”，

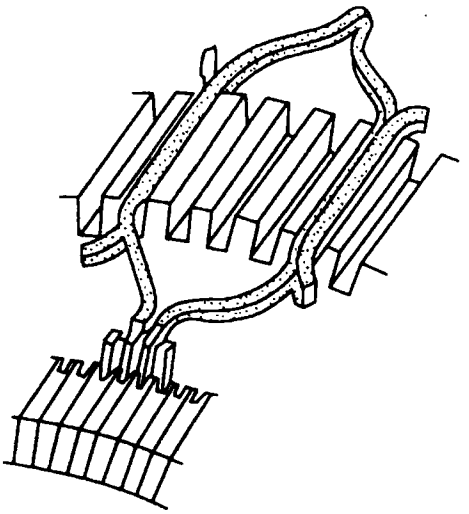


图 1-6　电枢绕组元件在槽内的放置

每个虚槽的上、下各有一个元件边。在一般情况下，实际的槽数 Z 与虚槽数 Z_u 的关系如下：

$$Z_u = uZ$$

在说明元件的空间安排情况时，就一律以虚槽来编号，用虚槽数作为计算单位。

因为每一个元件有两个元件边，而每个虚槽的上、下层各有一个元件边，显然元件数 S 和虚槽数 Z_u 相等。因为每个元件的头尾分别接到不同的两个换向片上，而每一个换向片都同时接有一个元件的上层元件边和另一个元件的下层元件边，所以元件数 S 一定与换向片数 K 相等，即

$$S = K = Z_u$$

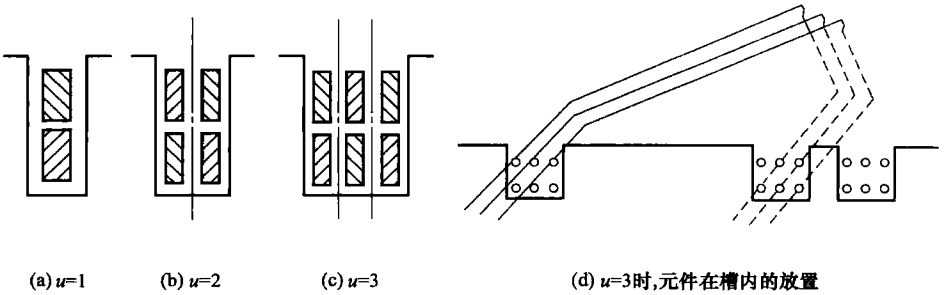


图 1-7　实槽与虚槽

（4）极距

每个磁极在电枢铁芯的外圆上所占的范围称为极距，用 τ 表示。极距可以用虚槽数或对应的圆弧长度表示，即

$$\tau = \frac{Z_u}{2p} \quad 或 \quad \tau = \frac{\pi D_a}{2p}$$

式中　Z_u——电枢的虚槽数；

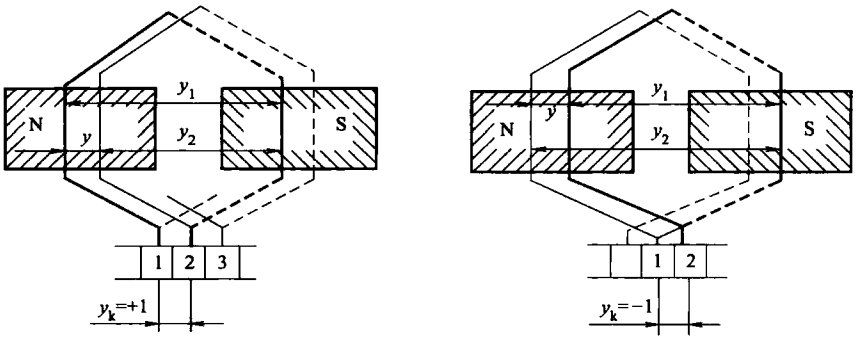
D_a——电枢铁芯外径；

p——电机的极对数。

（5）第一节距

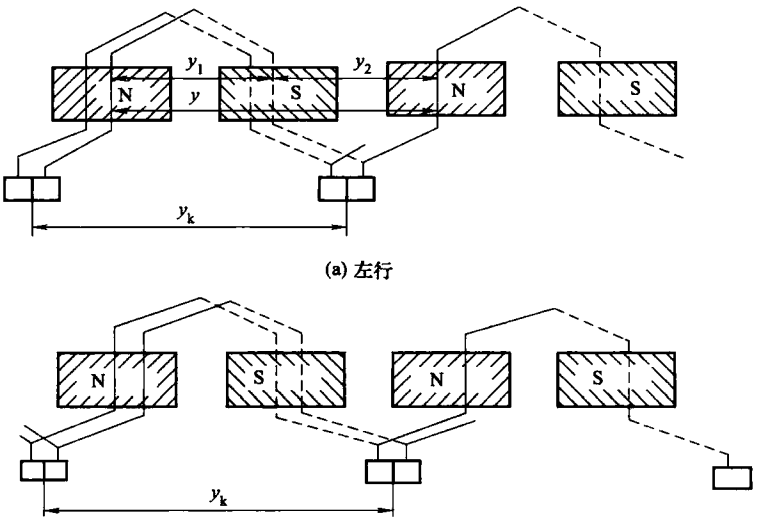
元件的两条有效边在电枢表面上所跨的距离称为第一节距，用 y_1 表示。第一节

距的大小通常用所跨的虚槽数计算，如图 1-8 和图 1-9 所示。因为元件边放置在槽



(a) 右行　　(b) 左行

图 1-8　单叠绕组



(a) 左行

(b) 右行

图 1-9　单波绕组

内，所以 y_1 一定要为整数，否则无法嵌线。为了得到较大的感应电动势，y_1 最好等于或者接近于一个极距 τ，即

$$y_1=\frac{Z_u}{2p}\pm\varepsilon$$

式中，ε 是为使 y_1 凑成整数的一个小数。当 $y_1=Z_u/(2p)$ 时，第一节距 y_1 恰好等于极距 τ，称为整距绕组，当 $y_1<Z_u/(2p)$ 时，称为短距绕组；当 $y_1>Z_u/(2p)$

时，称为长距绕组。短距绕组端接线较短，故应用较广。

（6）第二节距

利用同一个换向片串联起来的两个元件中，第一个元件的下层元件边与第二个元件的上层元件边之间在电枢表面上所跨的距离，称为第二节距，用 y_2 表示。第二节距也用虚槽数计算。在叠绕组中 y_2 为负值，在波绕组中 y_2 为正值。

（7）合成节距

相串联的两个元件的对应边在电枢表面所跨的距离，称为合成节距，用 y 表示。合成节距也用虚槽数计算。各种类型的电枢绕组之间的差别，主要表现在合成节距上。

（8）换向器节距

同一个元件的两个出线端所接的两个换向片之间在换向器表面所跨的距离，称为换向器节距，用 y_k 表示。换向器节距的大小用换向片数计算。

由于元件数等于换向片数，每连接一个元件时，元件边在电枢表面前进的距离，应当等于其出线端在换向器表面所前进的距离，所以换向器节距应当等于合成节距，即

$$y_k = y$$

1.2.2 直流电机绕组的分类

1.2.2.1 直流电机电枢绕组的分类

直流电机的电枢绕组有叠绕组、波绕组和混合绕组（又称蛙形绕组）三种类型。叠绕组中又有单叠绕组和复叠绕组之分。波绕组中也有单波绕组和复波绕组之分。

单叠绕组和单波绕组是电枢绕组的基本形式。复叠绕组、复波绕组分别是单叠绕组、单波绕组的组合。混合绕组则是叠绕组和波绕组的组合。

单叠绕组和单波绕组分别如图 1-8 和图 1-9 所示。

1.2.2.2 直流电机励磁绕组的分类

磁极线圈从工艺上分类可分为绝缘导线绕制的和裸铜（铝）条绕制的两种。绝缘导线绕制的又分为圆导线和扁导线两种。裸铜条绕制的又可分为平绕（宽边弯绕）和扁绕（窄边弯绕）两种。

绝缘圆导线绕制的磁极线圈如图 1-10（a）所示。直流电机的并励绕组线圈匝数较多而电流不大时，可以做成这一种。电流较大的中小型直流电机的主磁极线圈，可用高强度聚酯漆包扁铜（或铝）线或双玻璃丝包扁线绕制，如图 1-10（b）所示。为了出头方便，可按图中所示序号绕制（第 11 匝、12 匝为预先留线反绕）。出头的是最外面的第 10 匝和第 12 匝。

用裸铜条平绕的磁极线圈如图 1-10（c）所示。匝间绝缘在绕制过程中用绝缘带边绕边垫。为了工艺上的方便，线圈的段数最好为双数，这样抽头方便。

用裸铜条扁绕的线圈如图 1-10（d）所示。绕线应在扁绕机上连续进行。线圈绕

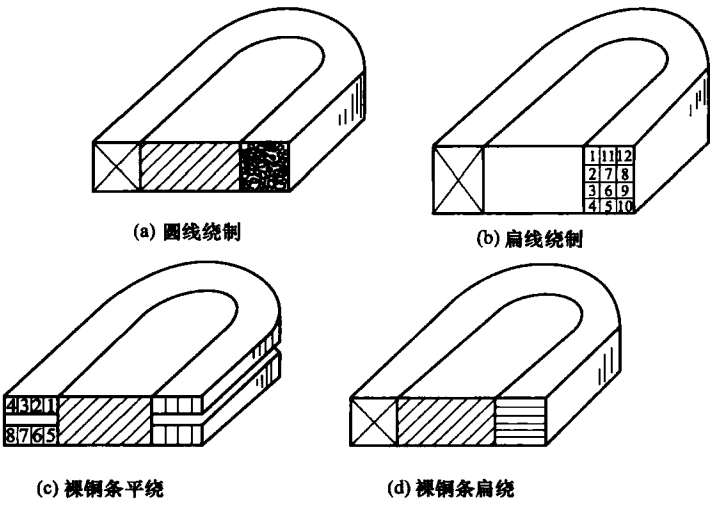


图 1-10　磁极线圈的类型

好后经过退火、整形等处理，按一定的设计匝数焊好引线，再垫匝间绝缘。这种线圈广泛用作直流电机串励绕组、换向极绕组和同步电机磁极绕组。

磁极线圈按其对地绝缘方式不同又可分为如下三种。

① 卷烘式——铁芯上包上云母纸、玻璃漆布等绝缘，用漆或树脂粘牢，加热固化，最后把绕好的线圈套上去。

② 骨架式——用金属的或绝缘的骨架，把绝缘和线圈装上去，然后进行浸漆（或浸胶）处理，最后再和铁芯装在一起。

③ 直接绕线式——磁极铁芯上包好绝缘以后，直接把导线绕在铁芯上面。

1.3 对绕组的技术要求

绕组是电机的重要部件之一，它的价格高、制造费工时，又是最容易损坏的部件，因此，绕组制造是电机制造中的关键工序之一。由于制造和运行维护的需要，绕组应满足下列基本要求。

（1）尺寸和形状的准确性

线圈的轴向长度、宽度（或弦长）以及每个线圈边截面的宽度和高度等应符合图样要求。

如果尺寸和形状不准确，线圈将无法嵌入槽内，即使嵌进去，也很难排列整齐，

有时还会使绝缘损坏，造成匝间短路、相间短路或接地。

（2）绝缘的可靠性

在电机运行中，线圈将受到电磁力、机械力及热应力的综合作用，为了使绕组的绝缘能在复杂的工作条件下长期可靠地运行，要求绝缘可靠性应有较多的裕度。电机必须在出厂试验中承受得住耐压试验。

为保证电机在正常工作温度下长期运行，要正确选择绝缘材料。绝缘层要致密均匀，无空隙存在，绝缘漆（或胶）要坚实。

（3）绕组的牢固性

电机绕组应能够承受在启动、突然短路等恶劣条件下电磁力以及其他外力的作用，而不产生变形和磨损，因此，在嵌线后必须将绕组牢固地加以紧固。

（4）焊接质量的可靠性

在电机绕组中，各种焊接接头必须具有良好的导电性能、力学性能、抗腐蚀性能、抗老化和冷热交变性能等，以保证焊接质量长期稳定可靠。因此，焊接后的接触电阻要小，以免造成局部发热或脱焊、断线等事故。

（5）其他要求

绕组所用的材料应供应方便、价格低廉。结构和工艺的选择应力求节省工时，减轻劳动强度，尽可能避免采用有毒性和刺激性的物质。有的电机绕组还应满足耐酸、耐碱、耐油等特殊要求。

第2章

三相交流异步电机定子绕组展开图

2.1 交流绕组的基本要求 / 17
2.2 利用槽电动势星形图绘制三相交流电机定子绕组展开图 / 17
2.3 利用三相电流的正方向绘制定子绕组展开图 / 45
2.4 三相异步电机定子绕组展开图识读实例 / 61

2.1 交流绕组的基本要求

对交流绕组的基本要求如下。

① 在一定导体数下，获得较大的基波电动势和基波磁动势；

② 在三相绕组中，对基波来说，三相电动势和磁动势必须对称，即三相大小相等而相位上互差 120°，并且三相的阻抗也要求相等；

③ 电动势和磁动势波形力求接近正弦波，为此要求电动势和磁动势中的谐波分量尽可能小；

④ 用铜量少，绝缘性能和机械强度可靠，散热条件好；

⑤ 制造工艺简单，检修方便。

交流电机绕组的种类虽然很多，但现代主要采用三相双层绕组，因为它能较好地满足上述要求。

槽电动势星形图是分析绕组的一个有效方法，特别是用于分析比较复杂的绕组（如分数槽绕组、变极调速绕组等）时，概念比较清楚。

利用三相电流的正方向绘制定子绕组展开图的方法简单，适用于初学者绘制常用的整数槽绕组等。

2.2 利用槽电动势星形图绘制三相交流电机定子绕组展开图

2.2.1 交流电机定子绕组槽电动势星形图的绘制

（1）什么是交流电机定子绕组槽电动势星形图

从电工基础可知，当磁场为正弦波时，电动势可用角速度 $\omega=2\pi f$ 的旋转相量表示，相量间的相位差角与导体沿定子圆周的布置是对应的。

当把电枢（三相交流电机的定子）上各槽内导体按正弦规律变化的电动势分别用相量表示时，这些相量构成一个辐射星形图，称为槽电动势星形图。

（2）绘制交流电机定子绕组槽电动势星形图的方法步骤

绘制交流电机定子绕组槽电动势星形图的方法步骤如下。

① 根据电机的定子槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$，计算电机的槽距电角（简称槽距角）α_1。

$$\alpha_1=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}$$

② 根据电机的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m（三相交流电机取 $m=3$；单相交流电机取 $m=2$），计算电机的每极每相槽数 q。

对于 60°相带的绕组：

$$q=\frac{Z_1}{2pm}$$

对于 120°相带的绕组：

$$q=\frac{Z_1}{pm}$$

③ 根据电机的槽距角 α_1 画出各槽中导体的电动势相量图（即槽电动势星形图），并标出各相量所属的槽号。

注意：当电机的极对数 $p=1$ 时，绕电机的槽电动势星形图一周，电机的全部槽号即可标注完成；当电机的极对数 $p=2$ 时，绕电机的槽电动势星形图一周，只能标注电机的全部槽号的二分之一，即绕电机的槽电动势星形图两周，电机的全部槽号才可标注完成；以此类推，当电机的极对数 $p=n$ 时，绕电机的槽电动势星形图 n 周，电机的全部槽号才可标注完成。

④ 根据电机的每极每相槽数 q，在电机的槽电动势星形图上标出各槽电动势相量所属的相别。

对于 60°相带的绕组其排列顺序为：A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……

对于 120°相带的绕组其排列顺序为：A、B、C、A、B、C……

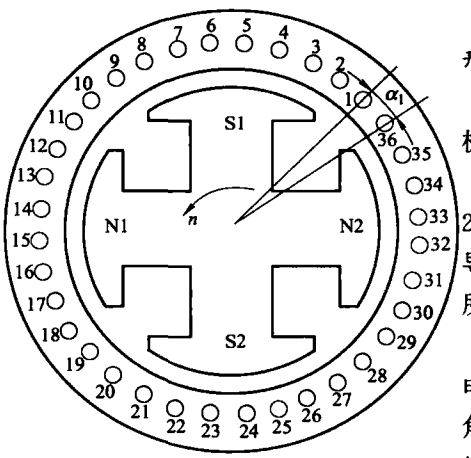


图 2-1　槽内导体沿定子圆周的分布情况

（3）绘制交流电机定子绕组槽电动势星形图的实例

下面用一个具体例子来说明三相交流电机定子绕组槽电动势星形图的绘制。

【例 2-1】 已知一台三相交流电机的极数 $2p=4$，定子槽数 $Z_1=36$，每槽内放置一根导体，定子槽内导体沿圆周分布情况如图 2-1 所示，试绘出槽电动势星形图。

解 在图 2-1 中，相邻两槽间的距离以电角度表示时，称为槽距电角（简称槽距角），以 α_1 表示。由于整个电枢圆周为 360°机械角度，以电角度计算时，一对极距范围就等于 360°电角度。当电机有 p 对极时，则电

枢圆周应为 $p\times360°$电角度，因此，槽距电角

$$\alpha_1=\frac{p\times360°}{Z_1}=\frac{2\times360°}{36}=20°$$

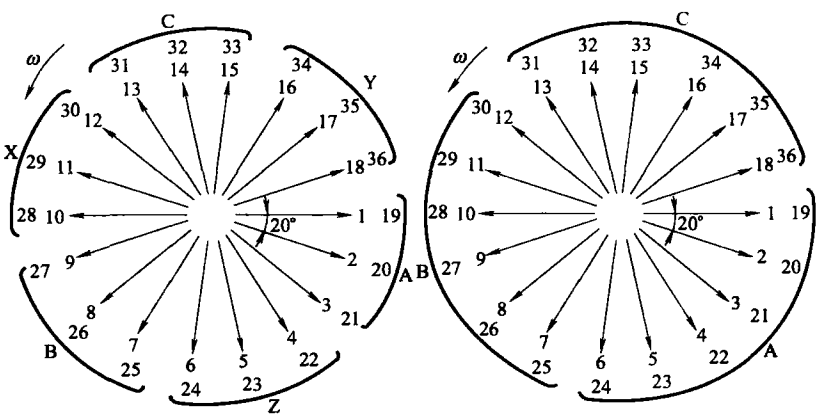
由于该电机的相数 $m=3$，所以对于 60°相带的绕组，其每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{4\times3}=3$$

而对于 120°相带的绕组，则其每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{pm}=\frac{36}{2\times3}=6$$

假设磁极磁场的磁密沿气隙圆周按正弦规律分布，当转子沿逆时针方向恒速旋转，定子各槽内导体的感应电动势将随时间按正弦规律变化。由于各槽在空间彼此互差 α_1 电角度，因此各导体电动势在时间相位上也彼此互差 α_1 电角度。于是，假设 1 号槽的导体电动势以相量 1 表示［见图 2-2（a)］，则在图示的转子转向下，2 号槽的导体电动势相量 2 比相量 1 滞后 20°。同理相量 3 比相量 2 滞后 20°。依此类推，就可绘出图 2-2（a）所示的槽电动势星形图。从图可见，19、20、21……相量与 1、2、3……相量分别重合，这是由于它们在磁极下分别处于对应的位置，所以它们的感应电动势同相位。一般说，对于每极每相槽数 q 为整数的整数槽绕组，如果电机有 p 对极，则有 p 个重叠的槽电动势星形。



(a) 60°相带　　(b) 120°相带

图 2-2　槽电动势星形图

普遍地说，当 p 和 Z 有最大公约数 t 时，则有 t 个重合的槽电动势星形。对本例题而言，p 和 Z 的最大公约数为 2，故有两个重合的槽电动势星形。

2.2.2 绘制三相交流电机定子绕组展开图的步骤

绘制绕组展开图的步骤如下。

(1) 绘槽电动势星形图

首先根据交流电机的定子槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$，计算电机的槽距电角（简称槽距角）α_1；然后根据电机的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算电机的每极每相槽数 q；最后再根据电机的槽距角 α_1 画出各槽中导体的电动势相量图（即槽电动势星形图），并标出各相量所属的槽号。

(2) 分相

所谓分相，就是在电动势星形图上划分各相所属槽号（即根据电机的每极每相槽数 q，在电机的槽电动势星形图上标出各槽电动势相量所属的相别）。分相的原则是使每相电动势最大，且三相电动势对称。为了使三相电动势相等，每相在每极下应占有相等的槽数，该槽数称为每极每相槽数，以 q 表示。

(3) 绘制绕组展开图

绘绕组展开图就是根据电动势星形图上分相的结果，把属于同一相的导体按一定规律连接起来，组成一相绕组，并标注出各相绕组的首末端。其具体方法是先将相邻磁极下属于同一相的导体连接成线圈，即要求每一个线圈的两个有效边（在定子槽内的导体）应近似相隔一个极距；然后再将同一个磁极下属于同一相的线圈串联成一个线圈组（一般双层绕组的每个线圈组应由 q 个线圈构成，故又将线圈组称为极相组）；最后再根据电机的并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接起来，构成一相绕组。

绘制绕组展开图时应注意三相绕组在空间应互差 120°的电角度。也就是说，三相绕组的首端应相差 120°的电角度。

2.2.3 三相双层叠绕组展开图的绘制

双层绕组的特点是每一个槽内有上下两个线圈边，线圈的一个边嵌在某一个槽的下层，另一个边则嵌在相隔 y 槽的上层，如图 2-3 所示。因为当电机定子绕组为双层绕组时，每个定子槽内分上、下两层，每一层放置线圈的一个有效边，所以每一个定子槽内可以放置两个有效边，而每一个线圈有两个有效边，因此对于三相双层绕组的电机，其整个绕组的线圈数正好等于电机定子的槽数 Z_1。

交流电机的叠绕组和直流电机中的单叠绕组一样，任何两个相邻的线圈都是后一个叠在前一个的上面。然后把属于同一相的相邻线圈直接串联起来，再通过一定的连接法构成三相绕组。下面用一个实例来说明。

【例 2-2】 已知一台三相交流电机，定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带、绕组节距 $y=\frac{5}{6}\tau$ 的三相双层叠绕组展开图。

解 绘制绕组展开图的步骤是：(1) 绘槽电动势星形图；(2) 分相；(3) 绘绕组展开图（即把各相导体按一定规律连接成对称三相绕组）。现分析如下。

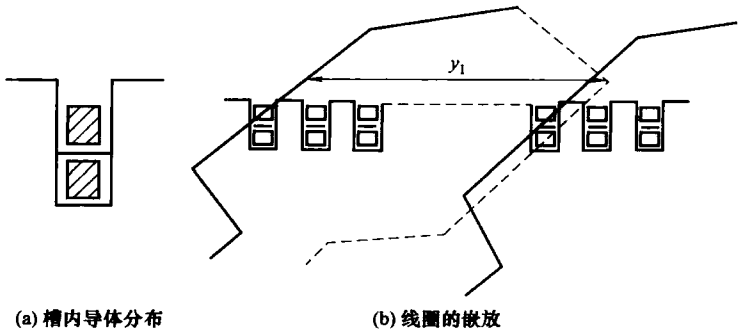


图 2-3　双层绕组图

（1）绘槽电动势星形图

由于本例题的极数、槽数、相带等与【例 2-1】相同，故槽电动势星形图与图 2-2（a）完全相同。

在双层绕组中，上层线圈边的电动势星形与槽电动势星形完全相同。下层线圈边的位置取决于线圈的节距 y。如果我们把各个线圈的上层边电动势相量与下层边电动势相量相减，可以得到各线圈的电动势相量，它们也构成一个电动势星形，相邻两相量间相位差也是 α_1。所以在双层绕组里，槽电动势星形的每一个相量既可以假定为槽内上层线圈边的电动势相量，也可以假定为一个线圈的电动势相量。在下面的分析中就是把它看成一个线圈的电动势相量，如相量 1 是上层边嵌于槽 1 的线圈的电动势相量。如果我们将线圈的上层边所在槽号，作为该线圈的编号，则相量 1 就是 1 号线圈的电动势相量。

（2）分相

所谓分相，就是在星形图上划分各相所属槽号。分相的原则是使每相电动势最大，且三相电动势对称。为了使三相电动势相等，每相在每极下应占有相等的槽数，该槽数称为每极每相槽数，以 q 表示

$$q=\frac{Z_1}{2pm}$$

式中 m 是相数。对本例题而言：

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{2\times2\times3}=3$$

根据分相原则和每极每相槽数 q，就可在星形图［图 2-2（a）］上进行分相。

以 A 相为例，由于 $q=3$，A 相在每个极下应占有三槽。在第一对极距范围内，如果在 S1 极下将 1、2、3 三个槽划归 A 相，在旁边标以字母 A，如图 2-2（a）所示。为了使每相合成电动势最大，则应把 N1 极下的 10、11、12 三个槽也划归 A 相，标以字母 X。类似地把第二对极距范围内的 19、20、21 和 28、29、30 等六个槽也划归 A 相。

同理，为了使三相绕组对称，应将距 A 相 120°电角度处的 7、8、9、16、17、18 和 25、26、27、34、35、36 划归 B 相。而将距 A 相 240°电角度处的 13、14、15、22、23、24 和 31、32、33、4、5、6 槽划归 C 相。

上述分相的特点是把每极下的定子槽数分为三等分，每相占一部分，故称每一等分为一相带。这里因每一相带宽度相当于$\frac{180^\circ}{m}=\frac{180^\circ}{3}=60^\circ$电角度，故称为 60°相带。

除上述分相方法，也可选 1、2、3、4、5、6 和 19、20、21、22、23、24 等 12 个槽作为 A 相，7、8、9、10、11、12 和 25、26、27、28、29、30 作为 B 相，以及 13、14、15、16、17、18 和 31、32、33、34、35、36 作为 C 相，而得到一个三相对称的 120°相带绕组，如图 2-2（b）所示。由于 60°相带绕组的合成电动势比 120°相带的大，故除了单绕组变极多速三相异步电机外，一般都用 60°相带绕组。

（3）绘绕组展开图

绘绕组展开图就是根据星形图上分相的结果，把属于各相的导体按一定规律连接起来，组成三相绕组。绘展开图时，把定子铁芯从齿中心沿轴向剖开，展成一平面，磁极在上面，如图 2-4 所示。由于原来编号是沿反时针编的（图 2-1），故展开后按自左至右编号。编号的原则是线圈和线圈的上层边所在的槽编为同一号码。绘图时，上层边用实线表示，下层边用虚线表示。其次把展开图上的槽分为 $2p$ 等分，每一等分为极距 τ。根据右手定则，可标出各槽内导体电动势的方向，如图 2-4（a）所示。然后，选择线圈节距，以 y 表示。设电机极距为 τ，以槽数计算极距。

对于本例题，电机极距 τ 为

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}\text{（槽）}$$

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{36}{2\times2}=9\text{（槽）}$$

则当 $y=\tau$ 时，称为整距绕组；当 $y>\tau$ 或 $y<\tau$ 时，分别称为长距或短距绕组。为了改善电动势波形以及节省材料，通常采用短距绕组。

由于本例题要求 $y=\frac{5}{6}\tau=\frac{5}{6}\times9=7.5$，而且节距 y 应该为整数，所以选取 $y=7$ 槽（也可以选取 $y=8$ 槽），则第 1 槽的上层导体与第 8 槽的下层导体连接起来构成第一个线圈，余类推，见图 2-4（a）。由此可确定 A 相绕组在各相带内的槽号如表 2-1 所示。

表 2-1　A 相绕组在各相带内的槽号

极 \ 相带	槽	A			Z			B			X			C			Y		
第一对极	槽号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	上层	●	●	●							●	●	●						
	下层	●							●	●	●							●	●
第二对极	槽号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	上层	●	●	●							●	●	●						
	下层	●							●	●	●							●	●

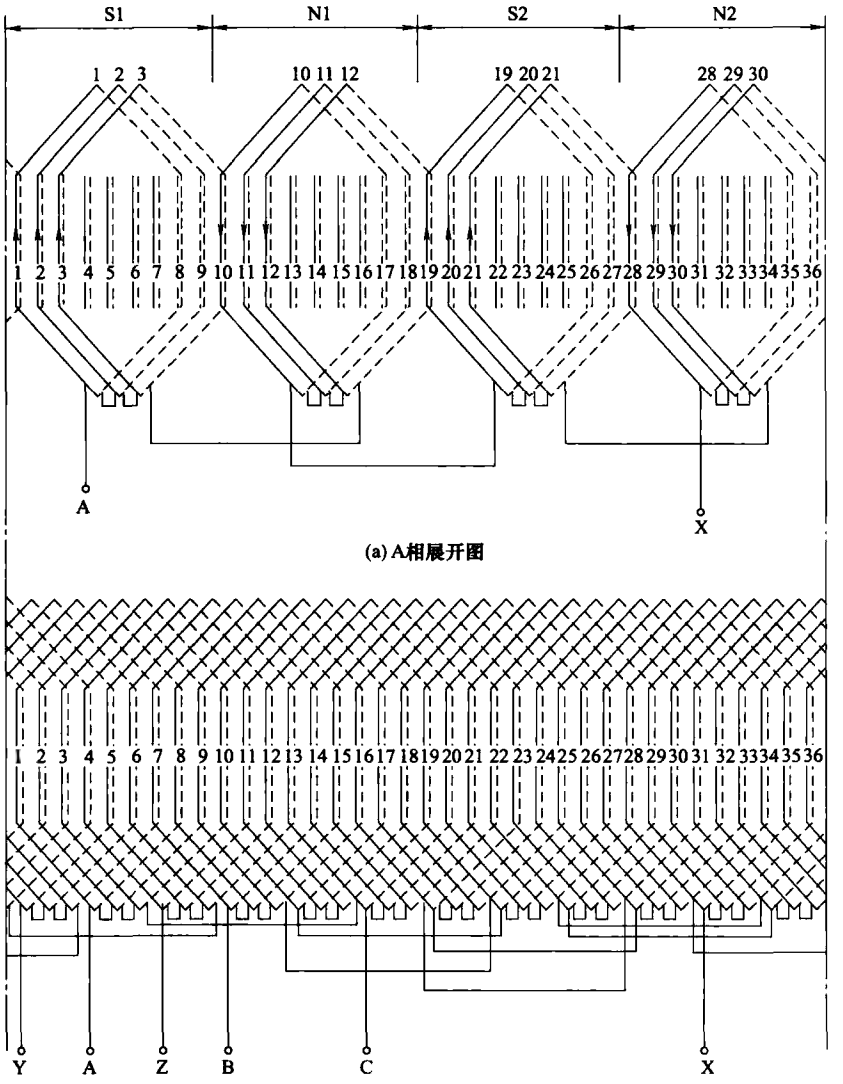


图 2-4　三相双层叠绕组展开图

（$2p=4$，$Z_1=36$，$a=1$）

表 2-1 中“●”表示 A 相绕组在各相带内的槽号，即表示 A 相绕组的线圈有效边在各相带内所占的槽号，例如 1 号线圈的上层边在 1 号槽的上层，而该线圈的下层边在 8 号槽的下层。

在双层绕组中，因为每槽放两个线圈边，而一个线圈有两个线圈边，所以线圈数等于槽数。在本例题中，$Z_1=36$，故有 36 个线圈。这时图 2-2（a）所示的 36 根相量可以认为是 36 个线圈的电动势相量。

以 A 相为例，根据图 2-2（a）中 A 相所属的线圈电动势相量，把上层边在第一

个极下的1、2、3三个线圈串联起来（线圈1的尾与线圈2的头接在一起，余类推）得到一个线圈组。类似地，把在其他极下属于A相的10、11、12；19、20、21；28、29、30线圈分别串联起来构成另外三个线圈组。这样，A相共有四个线圈组，如图2-4（a）所示。

从2-2（a）可见，每个线圈组的合成电动势大小相等，相位相同或相反，故每个线圈组可以独立成为一条支路。这样，对每极每相整数槽双层叠绕组，如果电机有$2p$个磁极，每相便有$2p$个线圈组，故每相最大并联支路数a_{max}等于极数$2p$。即

$$a_{max}=2p$$

对具体电机而言，各线圈组是串联还是并联，视所选并联支路数a而定。在本例题中，因要求$a=1$，所以四个线圈组应该串联成一条支路。由于不同极性下的线圈组电动势方向相反，如图2-2（a）和2-4（a）所示，为了使整个绕组的电动势相加，线圈组串联时应采用“尾接尾，头接头”（注：因为每个线圈组有两个出线端，一般在展开图中，将每个线圈组左侧的出线端称为头，而将每个线圈组右侧的出线端称为尾）的规律。这样就连成了A相绕组，如图2-4（a）所示。

同理，根据星形图上划分的B相和C相所属线圈电动势相量，按同样规律连接起来，便构成B相和C相绕组。这样，可得三相绕组的展开图如图2-4（b）所示。

在绘制B相绕组展开图时应注意，其首端B应滞后A相绕组的首端A 120°电角度，由图2-4（b）可知，A相绕组的首端A是从1号槽的上层边引出来的，由于槽距角α_1为

$$\alpha_1=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times 360^\circ}{36}=20^\circ$$

所以，B相绕组的首端B应与A相绕组的首端A相隔6个槽（因为$\frac{120}{\alpha_1}=\frac{120}{20}=6$），即B相绕组的首端B应从7号槽的上层边引出。同理，在绘制C相绕组展开图时应注意，其首端C应滞后B相绕组的首端B 120°电角度，所以C相绕组的首端C应与B相绕组的首端B相隔6个槽，即C相绕组的首端C应从13号槽的上层边引出。

【例2-3】 已知一台三相交流电机，定子槽数$Z_1=36$，极数$2p=4$，试绘制一个并联支路数$a=2$、60°相带、绕组节距$y_1=\frac{5}{6}\tau$的三相双层叠绕组展开图。

解 由于该例题的定子槽数Z_1、极数、相带、绕组节距y及绕组形式等均与【例2-2】相同，仅并联支路数a不同。所以该例题的电动势星形图及绕组的布置应与【例2-2】相同，仅各相绕组中的线圈组之间的连接有区别。现分析如下。

如果将该电机的定子绕组改为$a=2$，则只需将图2-4中各相绕组所属的线圈组之间的连接线改接成两路即可。改接方法很多，但是要求改接后各条支路中的线圈组的数目应当相等，而且各条支路中的线圈组在定子铁芯中的位置应当对称分布。因此该电机定子绕组展开图可以得到两种方案，分别如图2-5和图2-6所示。

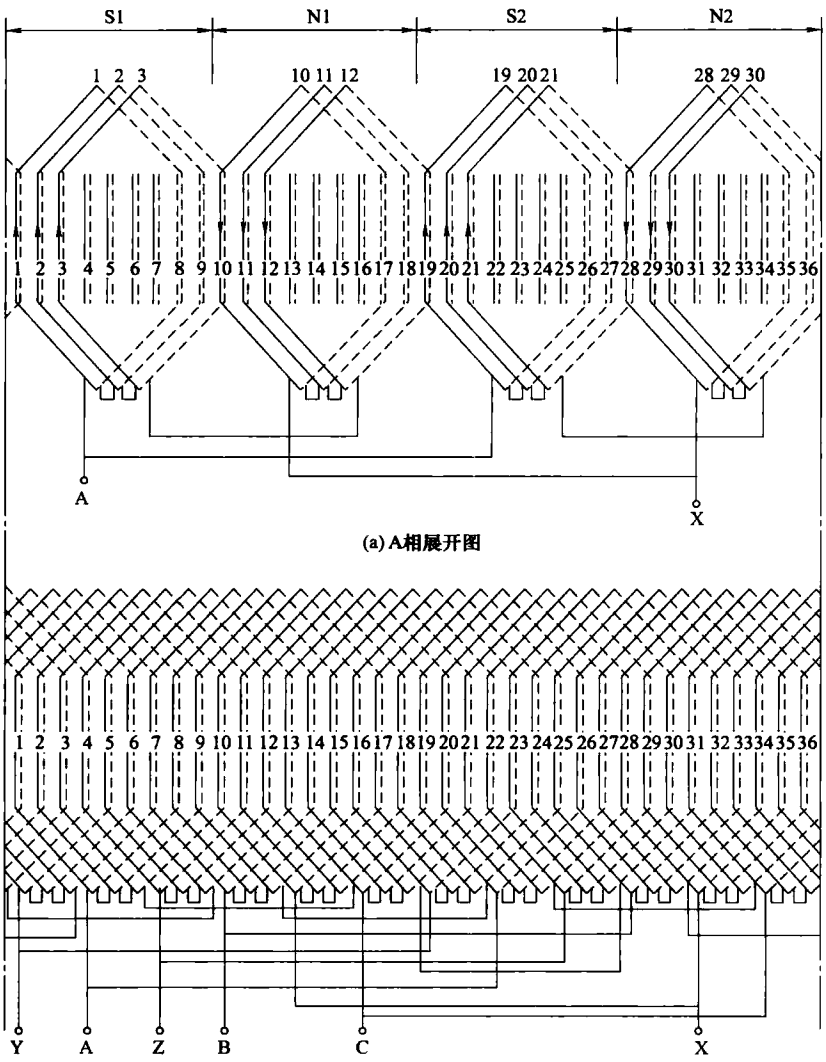
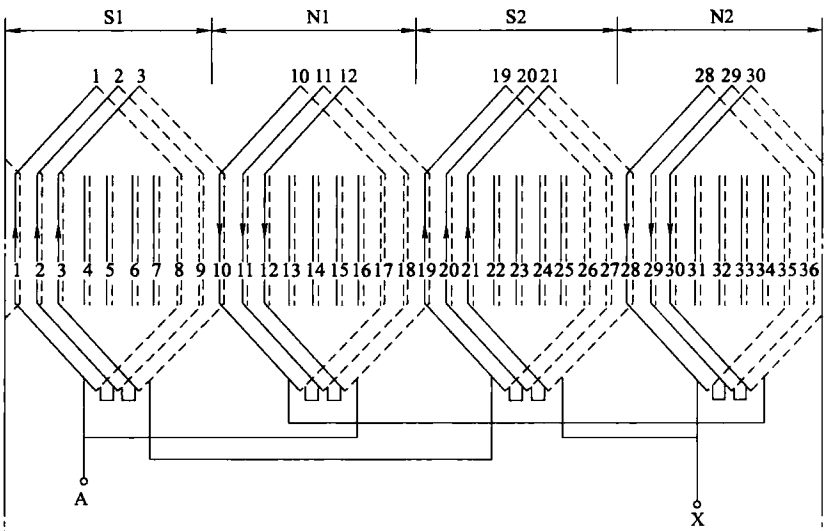


图 2-5 三相双层叠绕组展开图之一

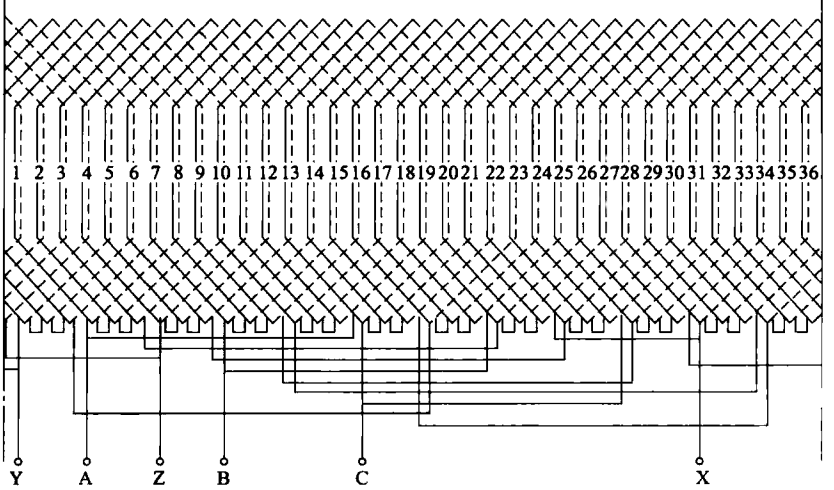
($2p=4$，$Z_1=36$，$a=2$)

2.2.4 三相双层波绕组展开图的绘制

交流电机的波绕组和直流电机的波绕组类似，任何两个串联线圈沿绕制方向像波浪似的前进。和直流电机一样，我们用合成节距 y 来表征波绕组的连接规律（见图2-7），它说明每串联一个线圈时，绕组沿绕制方向前进了多少槽。由于波绕组是依次把同极性下的线圈串联起来，每次前进约一对极距（2τ）。故对整数槽波绕组来说，合成节距 y 通常选为一对极距，即



(a) A相展开图



(b) 三相展开图

图 2-6　三相双层叠绕组展开图之二

($2p=4$，$Z_1=36$，$a=2$)

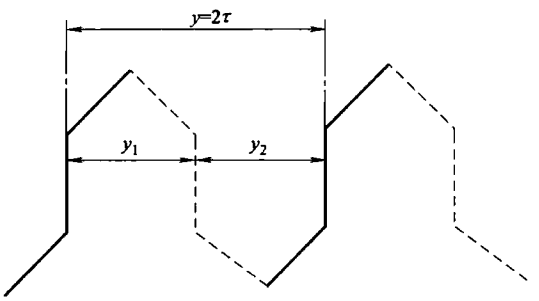


图 2-7　波绕组元件的节距

$$y=\frac{Z_1}{p}=2mq\ (槽)$$

但当合成节距这样选择时，在绕组串联 p 个线圈（沿定子绕了一周）后，绕组将回到原来出发的槽号而自行闭合。因此，为了把所有属于同一相的线圈全部连接起来，每绕完一圈之后，必须人为地前进或后退一个槽，才能使绕组继续地绕下去。下面用具体例子来说明。

【例 2-4】 已知一台三相交流电机，定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带的三相双层波绕组展开图。

解 绘制波绕组展开图的步骤与绘叠绕组的步骤完全相同。由于本例题与例题 2-2 有相同的槽数和极数，故槽电动势星形图和分相结果与【例 2-2】完全相同，见图 2-2（a），这里不再重复。

绘制三相双层波绕组展开图时，首先应确定线圈的各种节距，设选合成节距

$$y=\frac{Z_1}{p}=\frac{36}{2}=18\ (槽)$$

取第一节距

$$y_1=7\ (槽)$$

则第二节距

$$y_2=y-y_1=18-7=11\ (槽)$$

现以 A 相为例说明具体接法。设从 S1 极下槽 3 开始，按节距 y_1、y_2 和 y 进行连接，如图 2-8 所示，连接顺序如下：A1（头）—3 上 -(3+7=10 下)—(10+11=21 上)—(21+7=28 下)，这样绕过了两对极，即沿定子内圆表面绕过了一周。如果这时第二节距 y_2 仍用 11 槽，则绕组将接到 28+11=39=36+3，即回到 3 号槽的上层边而自行闭合。为了使绕组能继续绕下去，在绕第二圈时，把 y_2 缩短一槽，即使 $y_2=10$，使第二圈从第二槽的上层边开始往下绕，即（28+10=36+2，即 2 上)—(2+7=9 下)—(9+11=20 上)—(20+7=27 下)。在绕第三圈时，又将 y_2 缩短一个槽距，使第三圈从 1 号槽的上层边往下绕，即（27+10=36+1，即 1 上)—(1+7=8 下)—(8+11=19 上)—(19+7=26 下)—X2（尾）。至此，绕完了所有上层边在 S 极下属于 A 相的六个线圈，构成 A 相绕组的一半。

同理，再从 N1 下把 A 相所属的槽按同样方法进行连接，其顺序为：A2（头)—12 上—（12+7=19 下)—(19+11=30 上)—(30+7=36+1 下)—(1+10=11 上)—(11+7=18 下)—(18+11=29 上)—(29+7=36 下)—(36+10=36+10 上)—(10+7=17 下)—(17+11=28 上)—(28+7=35 下)—X2（尾），绕完了所有上层边在 N 极下属于 A 相的六个线圈，构成 A 相绕组的另一半。由于这两半 A1—X1 和 A2—X2 的电动势方向相反，因此根据并联支路数 $a=1$，将 A 相绕组串联成一条支路时，应采用“尾接尾”，即 X1 和 X2 连接在一起，如图 2-8 所示。

从图 2-8 可见，当波绕组采用 $y=2\tau$ 时的连接规律是：绕组沿定子内圆表面绕行

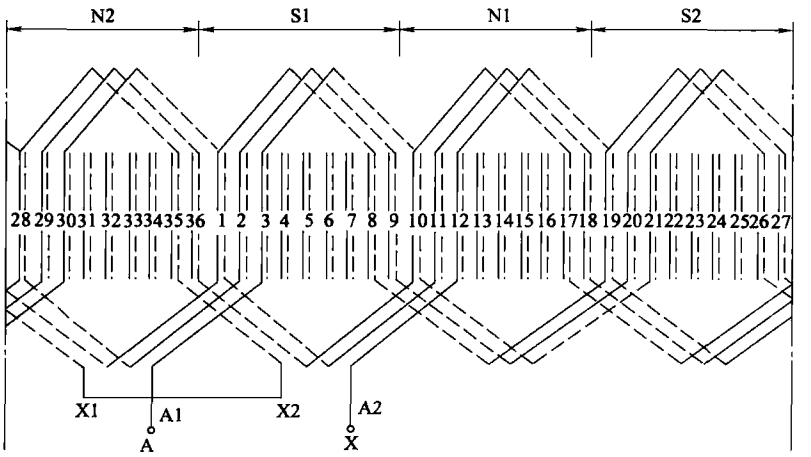


图 2-8　三相双层波绕组的 A 相展开图

（$2p=4$，$Z_1=36$，$a=1$）

q 圈，把所有上层边在 S 极下属于同一相的线圈按一定顺序串联起来，构成相绕组的一半，然后再沿定子内圆表面绕行 q 圈，把所有上层边在 N 极下属于同一相的线圈也按同样规律串联起来，构成相绕组的另一半。这两半绕组之间既可串联，也可并联，视所需支路数 a 所定。

图 2-8 为三相双层波绕组的 A 相展开图，而 B 相、C 相绕组展开图的绘制方法与 A 相绕组展开图的绘制方法相同，但在绘制 B 相绕组展开图时应注意，其首端 B1 应滞后 A 相绕组的首端 A1120°电角度，由图 2-8 可知，A 相绕组的首端 A1 是从 3 号槽的上层边引出来的，由于槽距角 α_1 为

$$\alpha_1=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times 360^\circ}{36}=20^\circ$$

所以，B 相绕组的首端 B1 应与 A 相绕组的首端 A1 相隔 6 个槽$\left(\text{因为}\frac{120}{\alpha_1}=\frac{120}{20}=6\right)$，即 B 相绕组的首端 B1 应从 9 号槽的上层边引出。同理，在绘制 C 相绕组展开图时应注意，其首端 C1 应滞后 B 相绕组的首端 B1 120°电角度，所以 C 相绕组的首端 C1 应与 B 相绕组的首端 B1 相隔 6 个槽，即 C 相绕组的首端 C1 应从 15 号槽的上层边引出。

绘制各相绕组的另一半绕组时，也应注意，B 相绕组的首端 B2 应与 A 相绕组的首端 A2 相隔 6 个槽$\left(\text{因为}\frac{120}{\alpha_1}=\frac{120}{20}=6\right)$，即 B 相绕组的首端 B2 应从 18 号槽的上层边引出。同理，在绘制 C 相绕组展开图时应注意，其首端 C2 应滞后 B 相绕组的首端 B2 120°电角度，所以 C 相绕组的首端 C2 应与 B 相绕组的首端 B2 相隔 6 个槽，即 C 相绕组的首端 C2 应从 24 号槽的上层边引出。

【例 2-5】 已知一台三相交流电机，定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个

并联支路数 $a=2$、60°相带的三相双层波绕组展开图。

解 由于该例题的定子槽数 Z_1、极数、相带、绕组节距 y 及绕组形式等均与【例 2-4】相同，仅并联支路数 a 不同。所以该例题的电动势星形图及绕组的布置应与【例 2-4】相同，仅各相绕组中的线圈组之间的连接有区别。现分析如下。

如果将该电机的定子绕组改为 $a=2$，则只需将图 2-8 中各相绕组所属的线圈组之间的连接线改接成两路即可。改接方法很多，但是要求改接后各条支路中的线圈组的数目应当相等，而且各条支路中的线圈组在定子铁芯中的位置应当对称分布。对于双层波绕组的电机，每相绕组共有两半绕组，及 A1—X1 和 A2—X2，当串联时（如图 2-8 所示）则得 $a=1$，如果并联（根据线圈电动势的方向，应当 A1 和 X2 连接作为头，A2 和 X1 连接作为尾），则得 $a=2$。所以，定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，并联支路数 $a=2$、60°相带的三相双层波绕组的 A 相绕组展开图如图 2-9 所示。

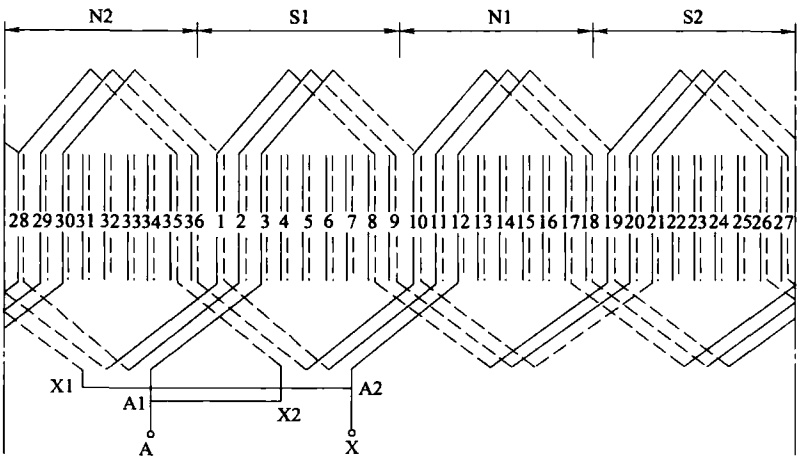


图 2-9 三相双层波绕组的 A 相展开图

（$2p=4$，$Z_1=36$，$a=2$）

图 2-9 为并联支路数 $a=2$ 时三相双层波绕组的 A 相展开图，而 B 相、C 相绕组展开图的绘制方法与 A 相绕组展开图的绘制方法相同，但在绘制 B 相绕组展开图时应注意，其首端 B1 应滞后 A 相绕组的首端 A1 120°电角度；其另一半绕组的首端 B2 应滞后 A 相绕组另一半绕组的首端 A2 120°电角度。同理，在绘制 C 相绕组展开图时应注意，其首端 C1 应滞后 B 相绕组的首端 B1 120°电角度；其另一半绕组的首端 C2 应滞后 B 相绕组另一半绕组的首端 B2 120°电角度。

2.2.5 三相单层等元件绕组展开图的绘制

单层绕组每槽只有一个线圈边，所以线圈数等于定子槽数的一半。单层绕组的形式很多，我们以等元件绕组为例说明单层绕组的连接规律。

这种绕组每个线圈的节距都是相等的，现用具体例子来说明。

【例 2-6】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$，60°相带的三相单层等元件绕组展开图。

解 单层绕组展开图的绘制步骤与双层绕组一样，由于本例题与前述双层叠绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，所以电动势星形图和分相结果仍如图 2-2（a）所示。

以 A 相为例，根据图 2-2（a）中 A 相所属的槽号，把在第一对极距范围内的 1、2、3 和 10、11、12 两部分槽内的线圈边连接起来，构成一个线圈组。同样，在第二对极距范围内，把属于 A 相的 19、20、21 槽和 28、29、30 槽的线圈边连接起来构成另一个线圈组。显然，这两个线圈组的电动势是同相位的。它们之间可以串联或并联，视所需并联支路数 a 而定。串联时为了使电动势相加，两线圈组应采用“尾接头”的方法，如图 2-10 所示。

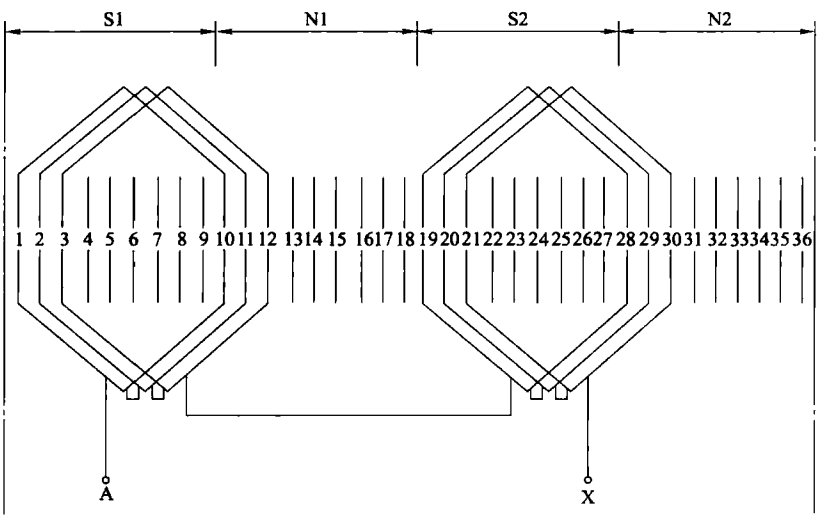


图 2-10 三相单层等元件 A 相绕组展开图

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

同理，可利用电动势星形图把属于 B 相和 C 相的线圈边连接起来，便得到图2-11所示的三相绕组展开图。

在绘制 B 相绕组展开图时应注意，其首端 B 应滞后 A 相绕组的首端 A 120°电角度，由图 2-4（b）可知，A 相绕组的首端 A 是从 1 号槽的上层边引出来的，由于槽距角 α_1 为

$$\alpha_1=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times 360^\circ}{36}=20^\circ$$

所以，B 相绕组的首端 B 应与 A 相绕组的首端 A 相隔 6 个槽 $\left(\text{因为}\frac{120}{\alpha_1}=\frac{120}{20}=6\right)$，即 B 相绕组的首端 B 应从 7 号槽的上层边引出。同理，在绘制

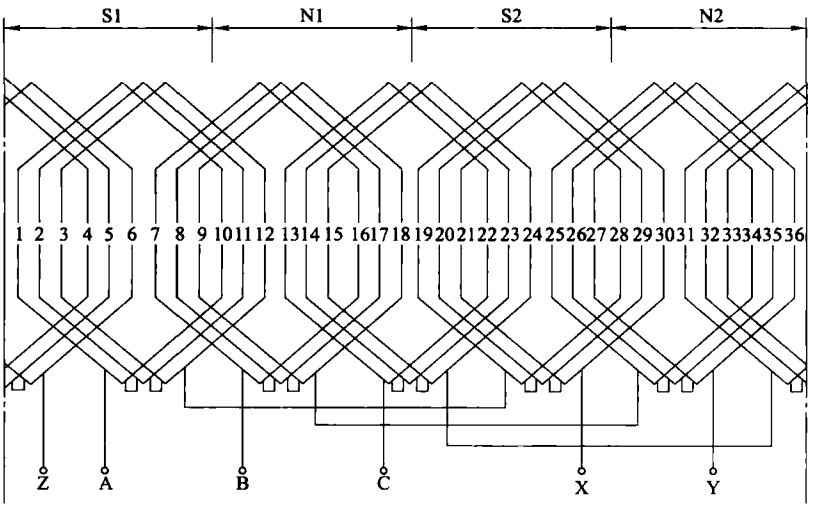


图 2-11　三相单层等元件绕组展开图

($Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$)

C 相绕组展开图时应注意，其首端 C 应滞后 B 相绕组的首端 B1 20°电角度，所以 C 相绕组的首端 C 应与 B 相绕组的首端 B 相隔 6 个槽，即 C 相绕组的首端 C 应从 13 号槽的上层边引出。

采用图 2-11 的连接法时，每个线圈的形状和大小都是一样的，故称为等元件绕组。图中每个线圈的节距 $y=\dfrac{Z_1}{2p}=9$ 槽，是一个整距绕组。在每极每相整数槽的双层叠绕组中，每相在每极下有一个线圈组，即电机的极数 $2p$ 有多少个，就有多少个线圈组，因此每相最大的并联支路数 $a_{max}=2p$；但在单层绕组中由于每相在每对极下才有一个线圈组，即电机的极对数 p 有多少个，就有多少个线圈组，因此每相的最大并联支路数等于极对数，即 $a_{max}=p$。

2.2.6　三相单层交叉式绕组展开图的绘制

单层绕组的其他连接形式是在等元件绕组的基础上发展起来的。从上面的分相可以看出，在交流电机中，当确定了各相所属线圈边（也即槽号）之后，只要把各相的线圈边按电动势相加的原则进行连接，就可得到对称的三相绕组。具体连接时，应该使端部尽可能短，以节省用铜量，同时也应考虑工艺方便。

【例 2-7】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$，60°相带的三相单层交叉式绕组展开图。

解　单层绕组展开图的绘制步骤与双层绕组一样，由于本例题与【例 2-1】双层叠绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，所以电动势星形图和分相结果仍如图 2-2（a）所示。

以 A 相为例，根据图 2-2（a）中 A 相所属的槽号，如果绘制三相单层等元件绕

组展开图，则应把在第一对极距范围内的 1、2、3 和 10、11、12 两部分槽内的线圈边连接起来，构成一个线圈组。同样，在第二对极距范围内，把属于 A 相的 19、20、21 槽和 28、29、30 槽的线圈边连接起来构成另一个线圈组，如图 2-10 所示。

由于各线圈边连接的先后次序并不影响电动势的大小，所以根据星形图 2-2（a）中划分的各相槽号，我们可以合理地改变每相 12 个线圈边的连接法，而得到单层交叉式、单层同心式等绕组展开图。

现在要求绘制三相单层交叉式绕组展开图，同样以 A 相为例，则应将某一个磁极下属于 A 相的槽内的线圈边分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于 A 相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈组，如图 2-12 所示。

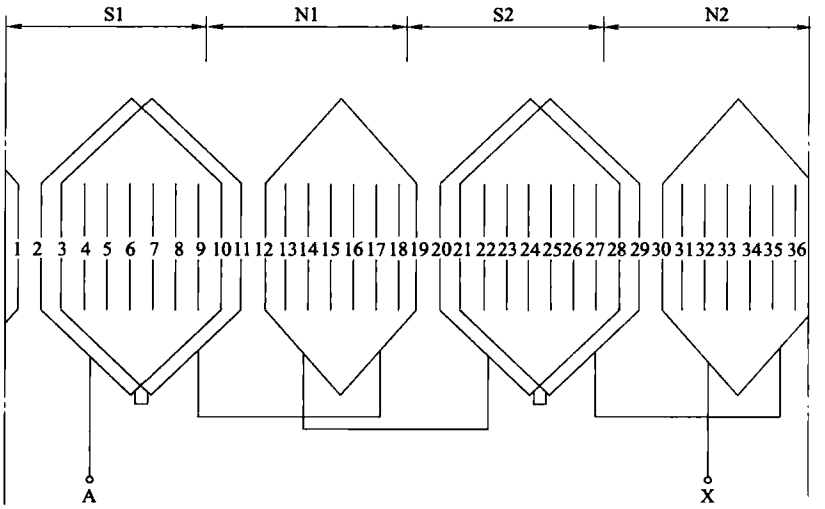


图 2-12　单层交叉式 A 相绕组展开图

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

由此可得绘制三相单层交叉式绕组展开图的原则（以 A 相为例）是：应将某一个磁极下属于 A 相的槽内的线圈边分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于 A 相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈组。B 相线圈和 C 相线圈构成的原则与 A 相线圈构成的原则相同，但应注意三相绕组在空间互差 120°的电角度。

在图 2-12 三相单层交叉式 A 相绕组展开图中，将磁极 N1 下属于 A 相的 12 号槽内的线圈边和磁极 S2 下属于 A 相的 19 号槽内的线圈边连接起来，构成了一个小线圈；而磁极 N1 下属于 A 相的 10 号槽内的线圈边和磁极 S1 下属于 A 相的 2 号槽内的线圈边连接起来，构成了一个大线圈，再将 N1 下属于 A 相的 11 号槽内的线圈边和磁极 S1 下属于 A 相的 3 号槽内的线圈边连接起来，构成了一个大线圈。同理，也将磁极 N2 下属于 A 相的槽内的线圈边分为了两部分，分别与相邻的 S 极下属于 A 相的槽内的线圈边相连接，构成一个小线圈和两个大线圈。

同理，根据三相绕组在空间互差 120°电角度分布的原则，可以绘制出三相单层

交叉式绕组展开图，如图 2-13 所示。

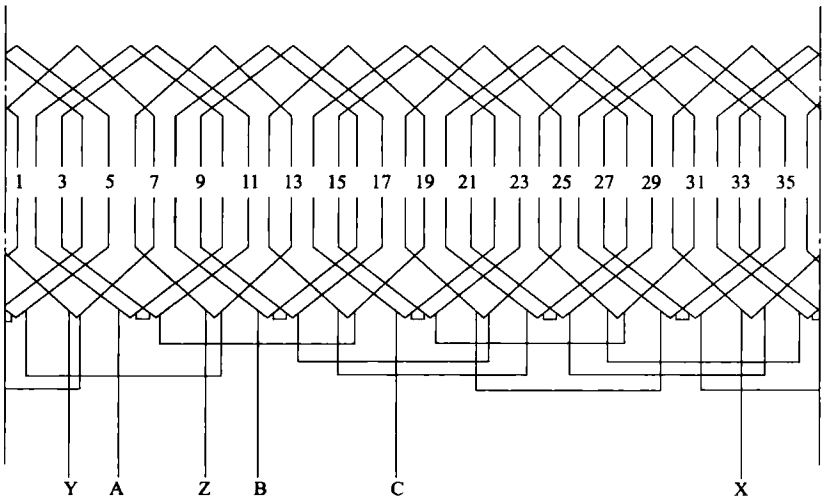


图 2-13 三相单层交叉式绕组展开图

$\left(2p=4,\ Z_1=36,\ a=1,\ y=\frac{2/1-9}{1/1\quad 8}\right)$

由图 2-12 可知，每相绕组有四个线圈组，它们之间可以串联或并联，视所需并联支路数 a 而定。串联时为了使电动势相加，每相相邻的线圈组应采用“头接头、尾接尾”的方法。

从图 2-10 中可以看出，A 相绕组中的 6 个线圈的节距 y 均为整距线圈，即 $y=\tau=9$。而从图 2-12 中可以看出，A 相绕组中的 6 个线圈中，两个小线圈的节距 y 为 7，四个大线圈的节距 y 为 8。其平均节距为 7.667。显然，单层交叉式绕组与单层等元件式绕组所占的定子槽号相同，所以这两种绕组的电气性能相同，但是，单层交叉式绕组中线圈的节距短，可以节省电磁线，所以电机的成本低，故得到了广泛的应用。

【例 2-8】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=2$，60°相带的三相单层交叉式绕组展开图。

解 由于本例题与【例 2-7】单层交叉式绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，仅绕组的并联支路数不同，所以每相绕组的分布与图 2-12 和图 2-13 相同。但是，各线圈组之间的连接有所不同。为了保证每条支路对称，则应保证每条支路的线圈的数目相同，并且在空间对称分布。对于本例题，最多只能构成两条支路，每条支路由两个大线圈和一个小线圈组成。

三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，定子绕组并联支路数 $a=2$，60°相带的三相单层交叉式绕组的展开图如图 2-14 所示。

2.2.7 三相单层链式绕组展开图的绘制

【例 2-9】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，试绘制一个

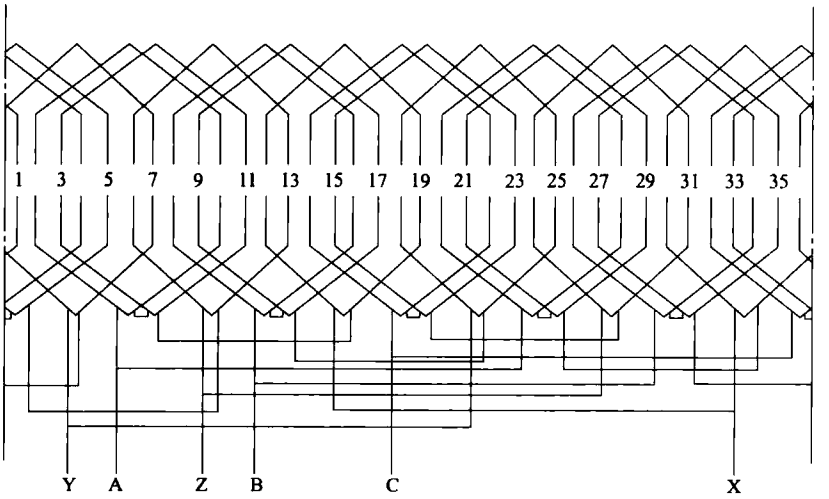


图 2-14　三相单层交叉式绕组展开图

$\left(2p=4,\ Z_1=36,\ a=2,\ y=\begin{matrix}2/1 & 9\\ 1/1 & 8\end{matrix}\right)$

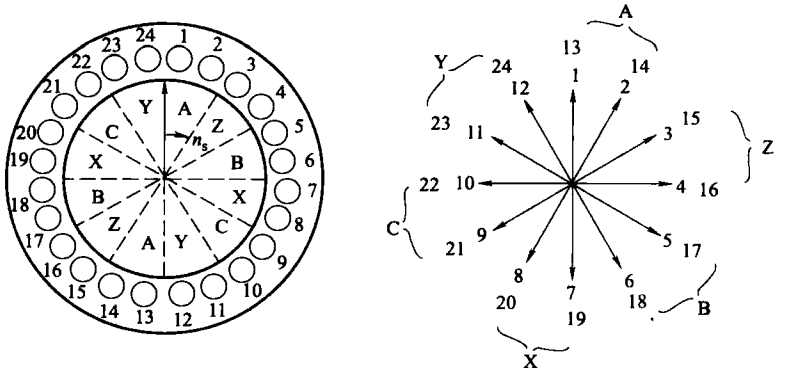
并联支路数 $a=1$，60°相带的三相单层链式绕组展开图。

解　(1) 绘制电动势星形图

因为槽距电角 α_1 为

$$\alpha_1=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times 360^\circ}{24}=30^\circ$$

所以其电动势星形图如图 2-15 所示。



(a) 导体在定子铁芯内圆周上的分布　　(b) 槽电势星形图

图 2-15　$Z_1=24$、$2p=4$ 定子槽电势星形图

(2) 分相

由于该电机的相数 $m=3$，所以对于 60°相带的绕组，其每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{24}{4\times3}=2$$

所以每相在每个极下应占两个槽。故各相绕组排列见表 2-2。

表 2-2 各相绕组排列表

槽号 \ 相带	A	Z	B	X	C	Y
第一对极	1,2	3,4	5,6	7,8	9,10	11,12
第二对极	13,14	15,16	17,18	19,20	21,22	23,24

(3) 绘制绕组展开图

由于线圈有效边是产生电磁作用的主要部分，所以只要保持线圈有效边的电流流向不变，端部连接方式的改变是不会改变电磁情况的。

绘制三相单层链式绕组展开图的原则（以 A 相为例）是：应将某一个磁极下属于 A 相的槽内的线圈边平均分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于 A 相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈（或线圈组）。B 相线圈和 C 相线圈构成的原则与 A 相线圈构成的原则相同，但应注意三相绕组在空间互差 120°的电角度。

在本例中，7 号槽和 8 号槽属于 A 相，而且在同一个磁极下，由于 7 号槽与相邻磁极下属于 A 相的 2 号槽相隔较近，8 号槽与相邻的另一个磁极下的 13 号槽相隔也较近，因此将 2—7 相连，8—13 相连得到两个线圈组。同理，将 14—19 相连，20—1 相连又得到两个线圈组。为了使四个线圈组的电动势相量相加，绕组内通入电流后形成四极磁场，线圈组间连线应是相邻线圈组依次反向串联，即“尾接尾，头接头”，因此可得 A 相绕组展开图，如图 2-16 所示。

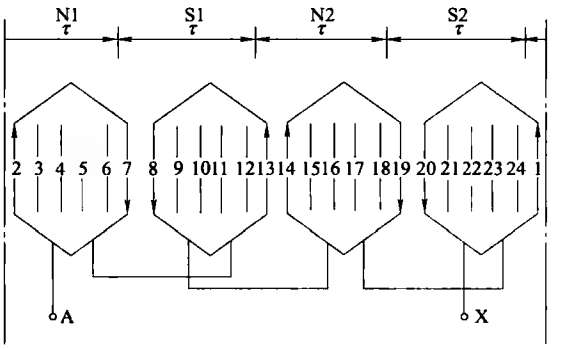


图 2-16 单层链式 A 相绕组的展开图

按照同样方法可得 B 相和 C 相绕组，图 2-17 为三相单层链式绕组的展开图。从图中可以看出：这种绕组的特点是线圈具有相同的节距（跨距），从绕组整体看，像套连起来的链环一样，故称为链式绕组。在单层链式绕组中，每相线圈数等于极数，三相绕组的引出线首端互隔 120°电角度。

该电机的定子绕组也可以采用单层等元件绕组展开图，其各线圈的节距应为 $y=\tau=6$。但是，若采用单层链式绕组，则各线圈的节距为 $y=5$。所以单层链式绕组与单层等元件绕组相比较，两种绕组所占的定子槽号相同，所以电机的性能相同，但单层链式绕组具有节约电磁线的优点。

【例 2-10】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=2$（或 $a=4$），60°相带的三相单层链式绕组展开图。

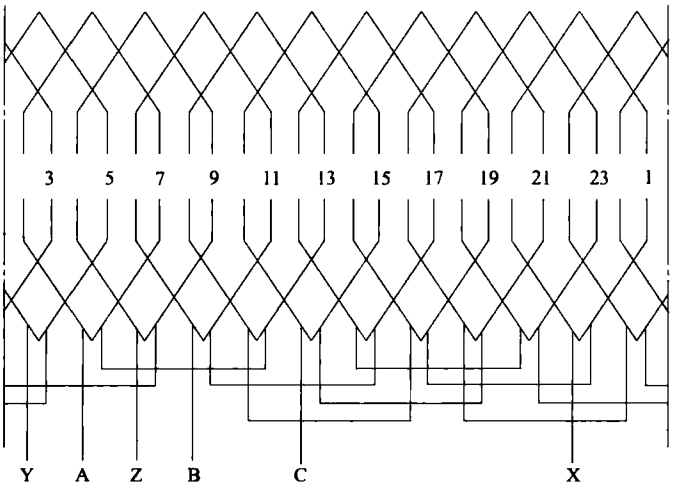


图 2-17　三相单层链式绕组展开图

（$2p=4$，Z_1-24，$a=1$，$y=1$ -6）

解　由于本例题与【例 2-9】单层交叉式绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，仅绕组的并联支路数不同，所以每相绕组的分布与图 2-16 和图 2-17 相同。但是，各线圈组之间的连接有所不同。为了保证每条支路对称，则应保证每条支路的线圈的数目相同，并且在空间对称分布。对于本例题，由于每相有四个线圈组，而且各线圈组的节距相同，所以最多可以连接成四条支路。

三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，定子绕组并联支路数 $a=2$，60° 相带的三相单层链式绕组的展开图如图 2-18 所示。

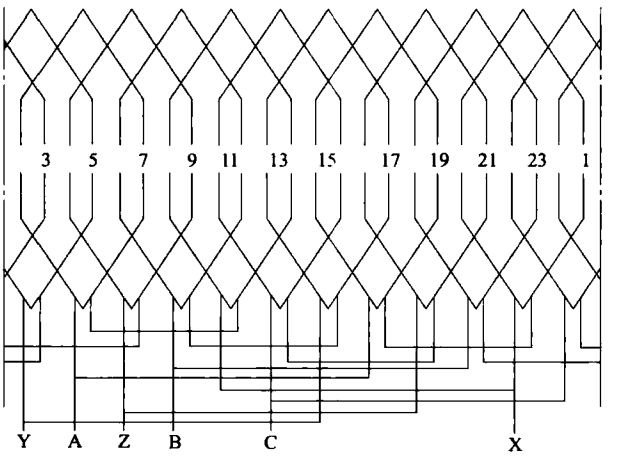


图 2-18　三相单层链式绕组展开图

（$2p=4$，$Z_1=24$，$a=2$，$y=1$　6）

同理，三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，定子绕组并联支路数 $a=4$，60°相带的三相单层链式绕组的展开图如图 2 19 所示。

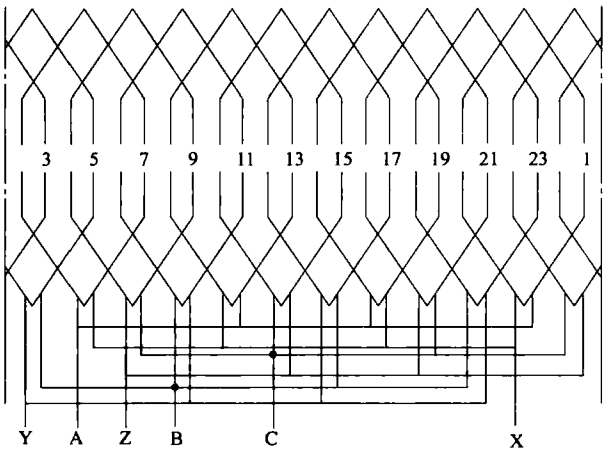


图 2-19　三相单层链式绕组展开图

（$2p=4$，$Z_1=24$，$a=4$，$y=1-6$）

2.2.8　三相单层同心式绕组展开图的绘制

【例 2-11】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=2$，试绘制一个并联支路数 $a=1$，60°相带的三相单层同心式绕组展开图。

解　（1）绘制电动势星形图

因为槽距电角 α_1 为

$$\alpha_1=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{1\times 360^\circ}{24}=15^\circ$$

所以其电动势星形图如图 2-20 所示。

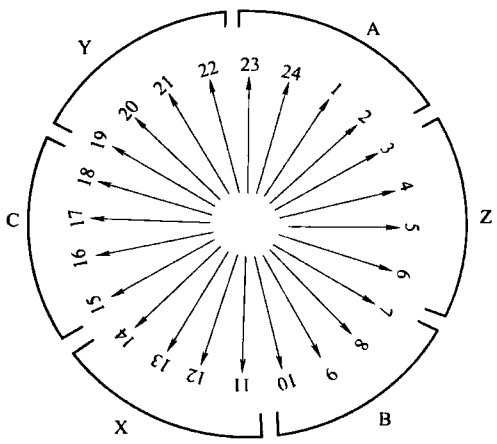


图 2-20　$Z_1=24$、$2p=2$ 的槽电动势星形图

（2）分相

由于该电机的相数 $m=3$，所以对于 60°相带的绕组，其每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{24}{2\times 3}=4$$

所以每相在每个极下应占四个槽。按最大电动势原则，将整个定子分成六个相带，并将各个相带内的槽号列表，故各

相绕组排列见表 2-3。

表 2-3　各相绕组排列表

相带	A	Z	B	X	C	Y
槽号	23,24,1,2	3,4,5,6	7,8,9,10	11,12,13,14	15,16,17,18	19,20,21,22

（3）绘制绕组展开图

由于线圈有效边是产生电磁作用的主要部分，所以只要保持线圈有效边的电流流向不变，端部连接方式的改变是不会改变电磁情况的。单层同心式绕组是由不同节距的同心线圈组成。

绘制三相单层同心式绕组展开图的原则（以 A 相为例）是：应将某一个磁极下属于 A 相的槽内的线圈边分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于 A 相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈组。B 相线圈和 C 相线圈构成的原则与 A 相线圈构成的原则相同，但应注意三相绕组在空间互差 120°的电角度。

仍以 A 相绕组为例（见图 2-21），A 相绕组由 A 相带的 23、24、1、2 和 X 相带的 11、12、13、14 号槽内的导体组成。同样，为了缩短线圈端部连接线，把 1—12 相连，组成一个大线圈（节距 $y=11$），2—11 相连，组成一个小线圈（节距 $y=9$），即可得到一个同心式的线圈组，如图 2-21 所示；再把 13—24 相连，14—23 相连，组成另一个线圈组；为了使两个线圈组的电动势相量相加，绕组内通入电流后形成二极磁场，最后把这两个线圈组反向串联（即“尾接尾，头接头”，把两个线圈组的尾端 11 和 23 相连，从首端 1 和 13 引出），即得 A 相的首端 A 和尾端 X。因此可得 A 相绕组展开图。

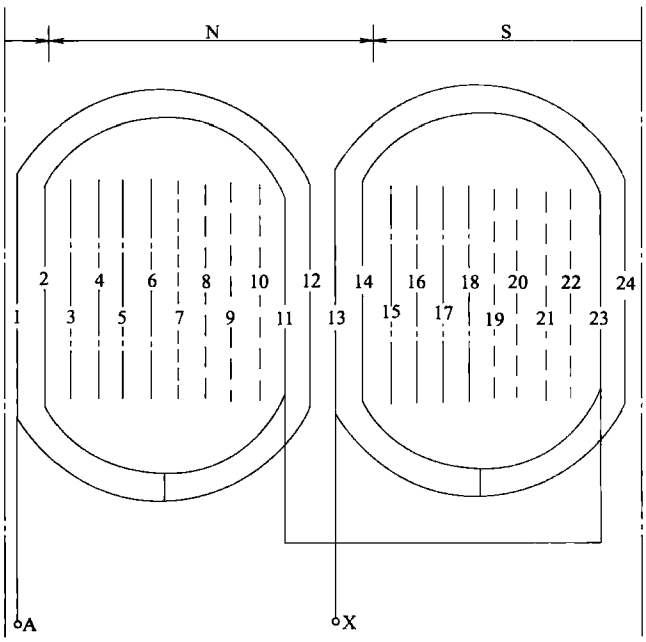


图 2-21　单层同心式绕组中 A 相的展开图

（$Z_1=24$，$2p=2$）

按照同样方法可得 B 相和 C 相绕组，图 2-22 为三相单层同心式绕组的展开图。从图中可以看出：这种绕组的特点是同一个线圈组中的各个线圈的节距大小不等，但彼此“同心”，故称为同心式绕组。在单层同心式绕组中，每相线圈组的个数等于极数，三相绕组的引出线首端互隔 120°电角度。

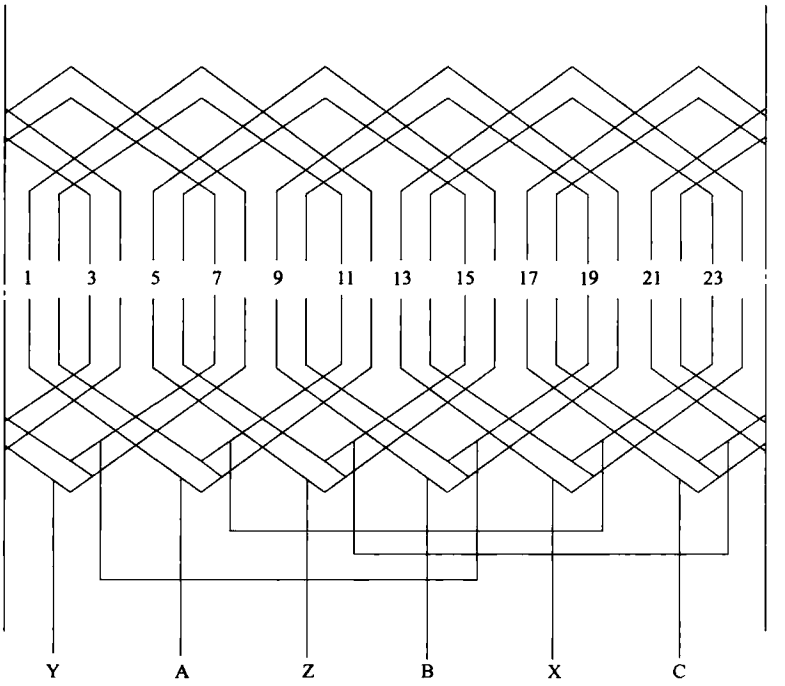


图 2-22　三相单层同心式绕组展开图

$\left(2p=2,\ Z_1=24,\ a=1,\ y=\begin{matrix}1-12\\2\quad 11\end{matrix}\right)$

该电机的定子绕组也可以采用单层等元件绕组展开图，其各线圈的节距应 $y=12$。但是，若采用单层同心式绕组，则各线圈的节距为 $y=11$ 和 $y=9$，线圈的平均节距 $y=10$。所以单层同心式绕组与单层等元件绕组相比较，两种绕组所占的定子槽号相同，所以电机的性能相同，但可以节约电磁线。

同心式绕组主要用于二极的小型三相异步电机，其优点是：嵌线方便，端部的重叠层数较少，便于布置，散热亦好。缺点是：线圈的大小不等，绕制不便。

【例 2-12】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=2$，试绘制一个并联支路数 $a=2$，60°相带的三相单层同心式绕组展开图。

解　由于本例题与【例 2-11】单层同心式绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，仅绕组的并联支路数不同，所以每相绕组的分布与图 2-21 和图 2 22 相同。但是，各线圈组之间的连接有所不同。为了保证每条支路对称，则应保证每条支路的线圈的数目相同，并且在空间对称分布。对于本例题，由于每相有两个线圈组，而且各线圈组的节距相同，所以最多可以连接成两条支路。

三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=2$，并联支路数 $a=2$，60°相带的三相单层同心式绕组的展开图如图 2-23 所示。

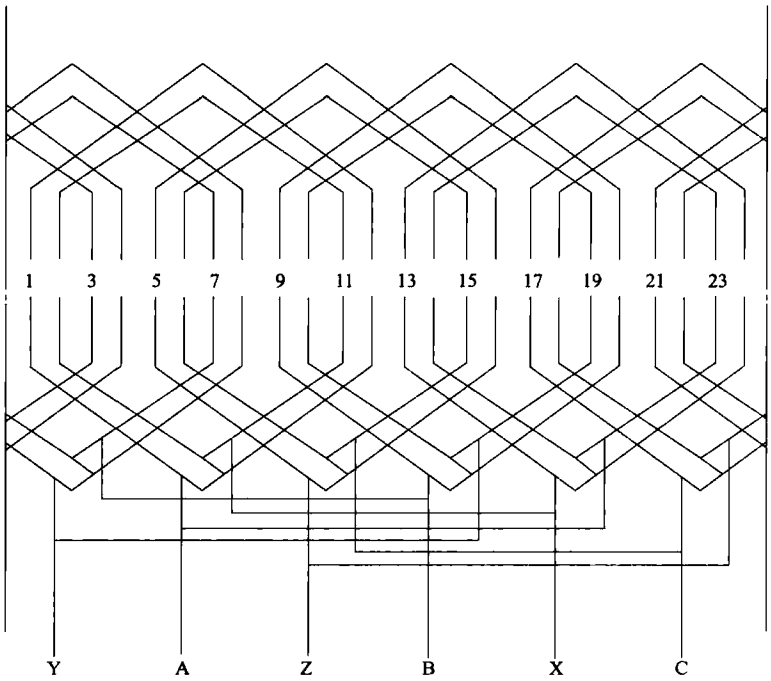


图 2-23　三相单层同心式绕组展开图

$\left(2p=2,\ Z_1=24,\ a=2,\ y=\begin{matrix}1 & 12\\ 2 & 11\end{matrix}\right)$

【例 2-13】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$，60°相带的三相单层同心式绕组展开图。

解　(1) 绘制电动势星形图

因为槽距电角 α_1 为

$$\alpha_1=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times 360^\circ}{24}=30^\circ$$

由于本例题与【例 2-9】单层链式绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，所以电动势星形图如图 2-15 所示。

(2) 分相

由于该电机的相数 $m=3$，所以对于 60°相带的绕组，其每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{24}{4\times 3}=2$$

所以每相在每个极下应占两个槽。由于本例题与【例 2-9】具有相同的槽距角 α_1 和每极每相槽数 q，故各相绕组排列见表 2-2。

（3）绘制绕组展开图

由于线圈有效边是产生电磁作用的主要部分，所以只要保持线圈有效边的电流流向不变，端部连接方式的改变是不会改变电磁情况的。

绘制三相单层同心式绕组展开图的原则（以 A 相为例）是：即可以将某一个磁极下属于 A 相的槽内的线圈边分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于 A 相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈（或线圈组）；也可以将某一个磁极下属于 A 相的槽内的线圈边分与相邻的异性磁极下属于 A 相的槽内的线圈边连接起来，构成一个线圈组。B 相线圈和 C 相线圈构成的原则与 A 相线圈构成的原则相同，但应注意三相绕组在空间互差 120°的电角度。

在本例中，1 号槽和 2 号槽属于 A 相，而且在同一个磁极下（位于 A 相带），而 7 号槽和 8 号槽也属于 A 相，但是都位于相邻磁极下（位于 X 相带），因此，可以将 1 号槽的导体与 8 号槽的导体相连组成一个大线圈；再将 2 号槽的导体与 7 号槽的导体相连组成一个小线圈。这两个线圈构成了一个同心式绕组的线圈组（见图 2-24）。同理，可以将 A 相带下的 13 号槽和 14 号槽内的导体分别 X 相带下的 19 号槽和 20 号槽内的导体相连（13—20 相连组成大线圈，14—19 相连组成小线圈），构成另一个同心式绕组的线圈组。为了使两个线圈组的电动势相量相加，绕组内通入电流后形成四极磁场，并考虑到并联支路数 $a=1$，线圈组间连线应是相邻线圈组依次正向串联，即“头接尾，尾接头”，因此可得 A 相绕组展开图，如图 2-24 所示。

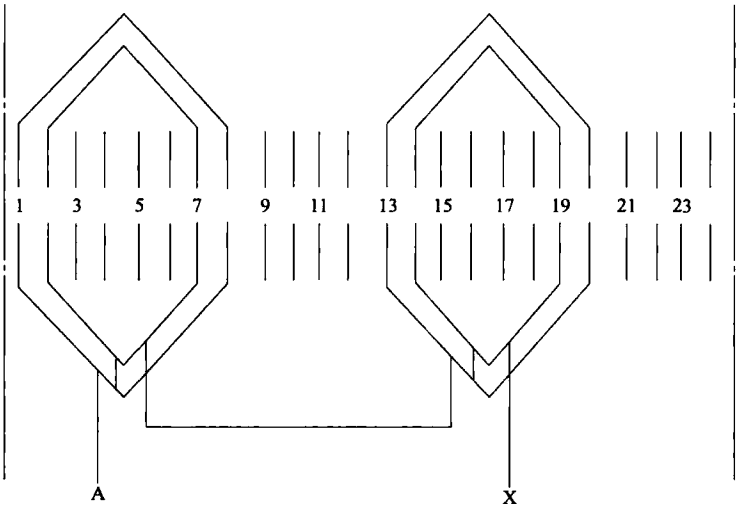


图 2-24　三相单层同心式 A 相绕组展开图

$\left(2p=2,\ Z_1=24,\ a=1,\ y=\begin{matrix}1 & -8\\ 2 & -7\end{matrix}\right)$

按照同样方法可得 B 相和 C 相绕组（注意三相绕组空间相差 120°的电角度），图 2-25 为三相单层同心绕组的展开图。从图中可以看出：这种绕组的特点是线圈具有不同的节距（跨距），大线圈与小线圈的轴线重合（又称同心），即小线圈外套着大线

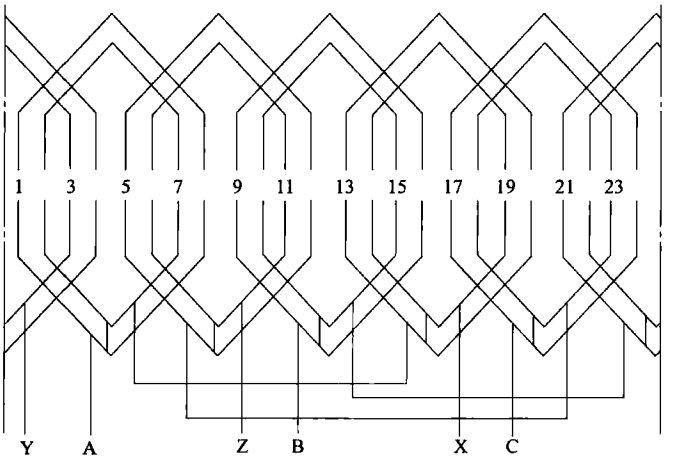


图 2-25　三相单层同心式绕组展开图

$\left(2p=2,\ Z_1=24,\ a=1,\ y=\begin{matrix}1 & 8\\ 2 & 7\end{matrix}\right)$

圈，故称为同心式绕组。

该例题的另一个特点是，图 2-24 和图 2-25 所示的绕组属于庶极式绕组，即每相绕组的线圈组的个数小于电机的极数（本例题中每相只有两个线圈组，而电机的极数 $2p=4$）。所以，每相的线圈组间连线应是相邻线圈组依次正向串联，即“头接尾，尾接头”。一般三相异步电机的定子绕组均为显极式绕组，其特点是每相绕组的线圈组的个数等于电机的极数（如【例 2-9】中每相有四个线圈组，电机的极数 $2p=4$），所以，每相的线圈组间连线应是相邻线圈组依次反向串联，即“头接头，尾接尾”。

将【例 2-9】与本例题进行比较可知，对于定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，60°相带的三相单层绕组。采用单层链式绕组比采用单层同心式绕组要好一些。因为该电机的定子绕组采用同心式绕组时，大线圈的节距为 $y=7$，小线圈的节距为 $y=5$，其平均节距为 $y=\dfrac{7+5}{2}=6$。但是，若采用单层链式绕组，则各线圈的节距为 $y=5$。所以单层链式绕组与单层同心式绕组相比较，两种绕组所占的定子槽号相同，所以电机的性能相同，但单层链式绕组具有节约电磁线的优点。

【例 2-14】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=2$，60°相带的三相单层同心式绕组展开图。

解　由于本例题与【例 2-13】单层同心式绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，仅绕组的并联支路数不同，所以每相绕组的分布与图 2-24 和图 2-25 相同。但是，各线圈组之间的连接有所不同。为了保证每条支路对称，则应保证每条支路的线圈的数目相同，并且在空间对称分布。对于本例题，由于每相有两个线圈组，而且各线圈组的节距相同，所以最多可以连接成两条支路。

三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，并联支路数 $a=2$，60°相带的三

相单层同心式绕组的展开图如图 2-26 所示。

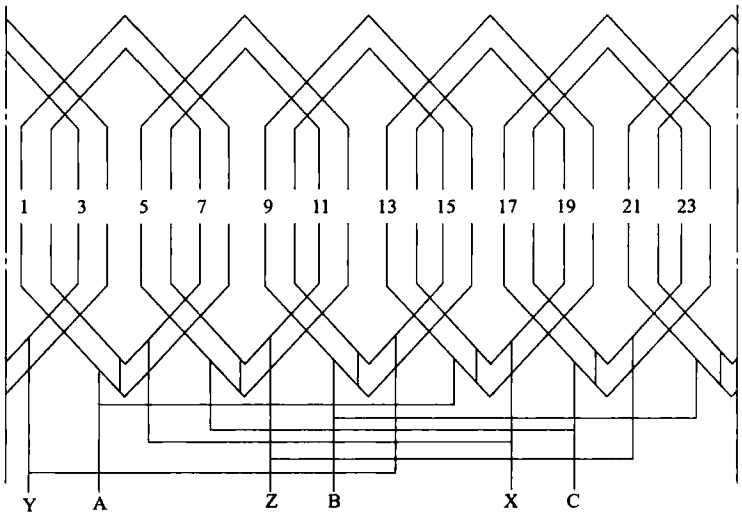


图 2-26 三相单层同心式绕组展开图

$\left(2p=4,\ Z_1=24,\ a=2,\ y=\begin{matrix}1 & 8\\ 2 & 7\end{matrix}\right)$

2.2.9 三相单双层混合绕组展开图的绘制

单双层混合绕组是在双层短距绕组的基础上演变过来的。以 $Z_1=36$、$2p=4$、$q=3$ 的

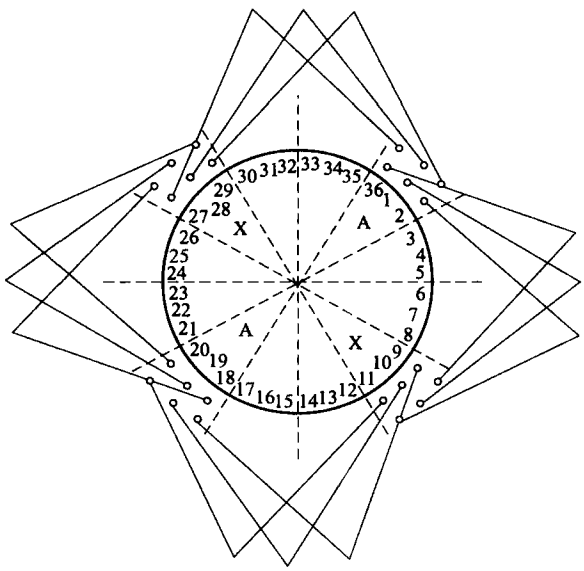


图 2-27 双层整距绕组中一相绕组的端部示意图

($Z_1=36$，$2p=4$，$y=9$)

三相异步电机的定子绕组为例，如果是双层整距绕组，则节距 $y=9$（即 $y=1-10$ 槽），属于 A 相的线圈（位于 A 相带和 X 相带下的导体构成的线圈）应如图2-27所示。

如果是双层短距绕组，假设取 $y=8$（即 $y=1—9$ 槽），则属于 A 相的线圈（位于

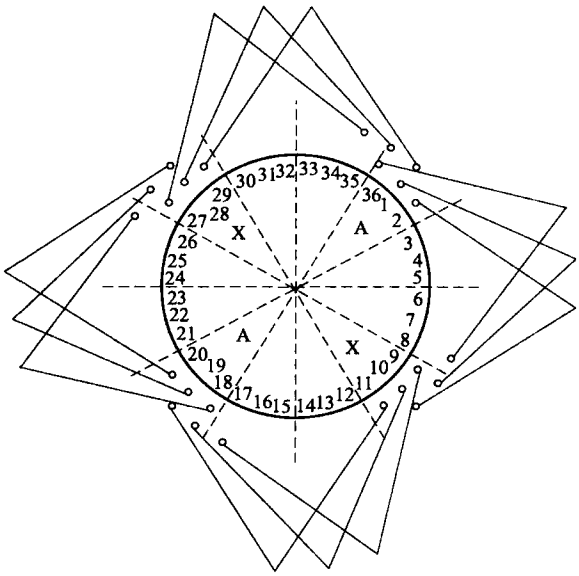


图 2-28　双层短距绕组中一相绕组的端部示意图

（$Z_1=36$，$2p=4$，$y-8$）

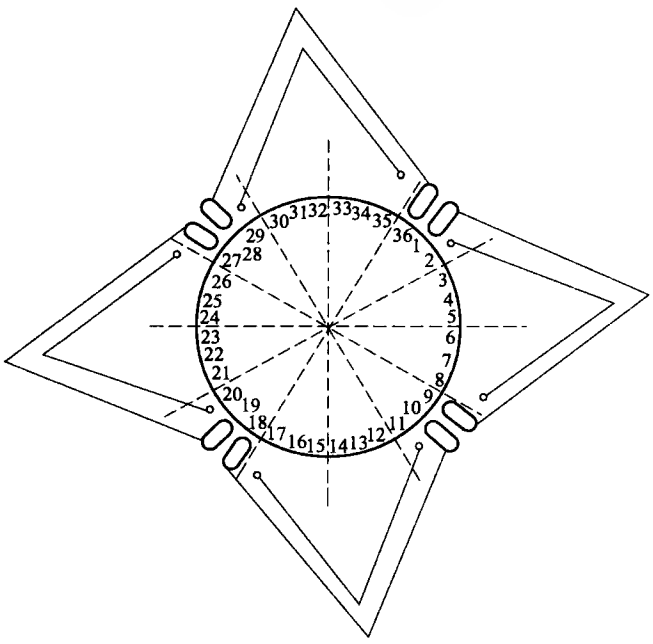


图 2-29　单双层混合绕组中一相绕组的端部示意图

$\left(Z_1=36,\ 2p=4,\ y=\begin{matrix}1-9\\2\ \ 8\end{matrix}\right)$

A 相带和 X 相带下的定子槽内上层的导体与相隔节距 y 的定子槽内下层的导体构成的线圈）应如图 2-28 所示，它是由图 2-27 演变过来的，即各个线圈的上层边不动，而下层边逆时针方向移过一个槽。

由图 2-28 可以看出，槽 36、1、9、10、18、19、27、28 中上下两层的导体都属于 A 相，因此可以把它们合并到一起，同时再把端部连接方法一改变，A 相绕组就可由图 2-28 演变到图 2-29。

在图 2-29 中，4 个大线圈占满了整个槽，是单层绕组的形式；4 个小线圈一个有效边位于某一个槽的下层，而另一个有效边则位于另一个槽的上层，是双层绕组的形式，因此这是一种单双层混合绕组。

单双层混合绕组展开图如图 2-30 所示。由于单双层混合绕组是由双层短距绕组变换过来的，所以它具有双层短距绕组能够改善电机的电气性能的优点，同时它又有一部分线圈是单层绕组，这一部分单层绕组具有不需层间绝缘的优点。另外，由于单双层混合绕组中线圈的平均节距比较短，故可以节省电磁线。单双层混合绕组在工艺上的优点是线圈端部弯曲变形不大，易于嵌线。

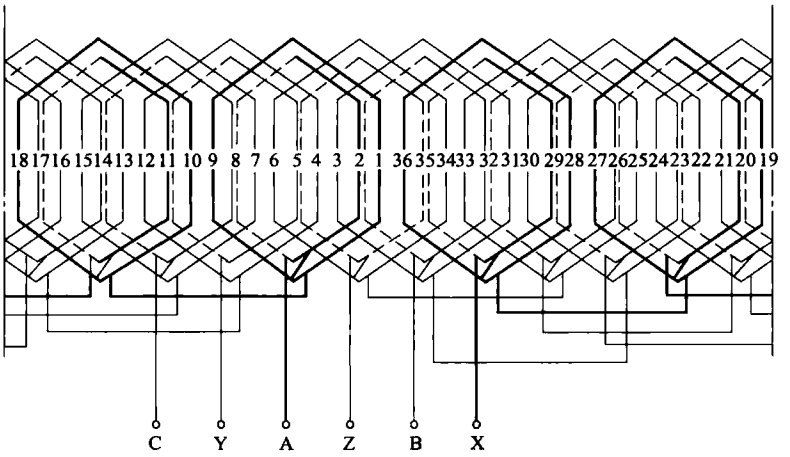


图 2-30　单双层混合绕组展开图

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

2.3 利用三相电流的正方向绘制定子绕组展开图

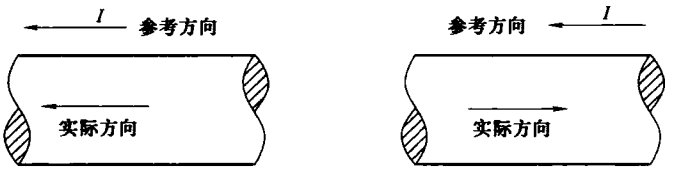
2.3.1　三相电流的正方向

电荷有规则地定向移动称为电流。在金属导体中，电流是电子在外电场作用下有

规则地运动形成的。

电流不仅有大小，而且有方向，习惯上规定以正电荷移动的方向为电流的方向。

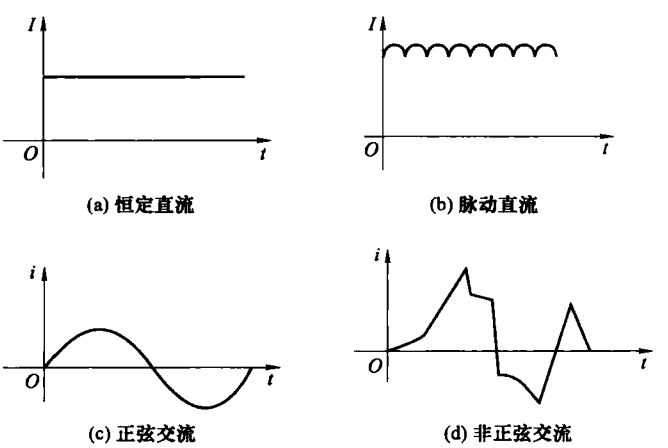
在分析或计算电路时，常常要求出电流的方向，但当电路比较复杂时，某段电路中电流的实际方向往往难以确定，此时，可先假定电流的参考方向（又称电流的正方向），然后列方程求解，当解出的电流为正值时，就认为电流的实际方向与参考方向一致，见图 2-31（a）；反之，当解出的电流为负值时，就认为电流的实际方向与参考方向相反，如图 2-31（b）所示。



(a) $I>0$　　(b) $I<0$

图 2-31　电流的方向

导体中的电流不仅可具有大小的变化，而且可具有方向的变化。大小和方向都不随时间而变化的电流称为恒定直流电流，如图 2-32（a）所示。方向始终不变，大小随时间而变化的电流称为脉动直流电流，如图 2-32（b）所示。大小和方向均随时间变化的电流称为交流电流。工业上普遍应用的交流电流是按正弦函数规律变化的，称为正弦交流电流，如图 2-32（c）所示，非正弦交流电流如图 2-32（d）所示。



(a) 恒定直流　　(b) 脉动直流

(c) 正弦交流　　(d) 非正弦交流

图 2-32　电流种类

为了区别直流电流和交流电流，直流电流和交流电流的有效值用大写字母 I 表示；交流电流的瞬时值用小写字母 i 表示，交流电流的最大值用 I_m 表示。

三相正弦交流电流随时间按正弦规律变化的波形如图 2-33 所示。

由图 2-33 可以看出，三相电流的瞬时值均随时间按正弦规律变化，其电流的有

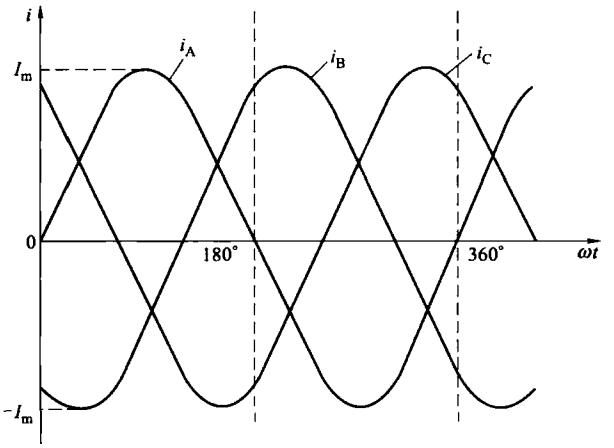


图 2-33　三相对称电流

效值和最大值均相等，但是三相电流的相位互差 120°电角度。例如：当 $\omega t=0°$时，A 相电流的瞬时值 $i_A=0$，B 相电流的瞬时值 $i_B<0$，C 相电流的瞬时值 $i_C>0$；当 $\omega t=90°$时，$i_A=I_m$，$i_B=-\frac{1}{2}I_m$，$i_C=-\frac{1}{2}I_m$；当 $\omega t=180°$时，$i_A=0$，$i_B>0$，$i_C<0$；当 $\omega t=210°$时，$i_A=-\frac{1}{2}I_m$，$i_B=I_m$，$i_C=-\frac{1}{2}I_m$……

在绘制电机绕组展开图时，也可采用电流正方向的方法绘制，一般将某电流的正方向选为从该相绕组的首端（A、B、C）指向该相绕组的末端（X、Y、Z）。当该相电流的瞬时值大于零时，该相电流的实际方向与该相电流的正方向相同，即该相电流的实际方向是从该相绕组的首端流向该相绕组的末端；当该相电流的瞬时值小于零时，该相电流的实际方向与该相电流的正方向相反，即该相电流的实际方向是从该相绕组的末端流向绕组的首端。

2.3.2　利用电流的正方向绘制绕组展开图的方法步骤

利用电流的正方向绘制三相交流绕组展开图的方法步骤如下。

（1）画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数 Z_1 画出 Z_1 个槽（即画出 Z_1 根平行线），并从左至右编写槽号。

（2）分极距

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$ 计算出电机的极距 τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}$$

然后根据电机的极距将定子槽数分为 $2p$ 个极距，并依次标注 N1、S1、N2、S2……

（3）分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的每极每相槽数 q

$$q=\frac{Z_1}{2pm}$$

然后根据电机的每极每相槽数 q 将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 m 相；对于 120°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每对极距内的定子槽分为 m 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……或用不同颜色将分别属于三相的槽予以区分。

（4）标注电流的正方向

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向。标注电流正方向的原则如下。

① 对于单层绕组，相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反。

② 对于双层绕组，只标注各槽内上层导体的电流的正方向，标注方法与单层绕组的标注方法相同，即，相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反。

（5）绘制线圈和线圈组

绘制线圈和线圈组的方法如下。

① 对于单层绕组，按照所需的绕组形式（如同心式、交叉式、链式等）的特点，根据槽内导体的电流方向，将某一个极距内的导体与相邻的（一侧或两侧）极距内属于同一相的导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以 A 相为例：将 A 相带内的导体分别与相邻的（一侧或两侧）极距下的 X 相带内的导体组成线圈；或将 X 相带内的导体分别与相邻的（一侧或两侧）极距下的 A 相带内的导体组成线圈。然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于 A 相的线圈串联成线圈组。

② 对于双层绕组，按照所需的绕组形式（如叠绕组、波绕组等）的特点，根据槽内上层导体的电流方向，将某一个极距内的定子槽内的上层导体与相邻极距内相距一个节距 y 的槽内的下层导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以 A 相为例：将 A 相带内的定子槽内的上层导体与相邻极距内相距一个节距 y 的槽内的下层导体连接成线圈；并将 X 相带内的定子槽内的上层导体与相邻极距内相距一个节距 y 的槽内的下层导体连接成线圈。然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于 A 相的线圈串联成线圈组。

（6）绘制相绕组

已经连接成的线圈组，具有两个出线端，一般把每一个线圈组的左侧的出线端称为线圈组的首端（又称为线圈组的头）；而把每一个线圈组的右侧的出线端称为线圈组的末端（又称为线圈组的尾）。绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的

线圈组连接起来，构成相绕组。构成的每相绕组都有两个出线端，一个出线端称为该相绕组的首端（又称为该相绕组的头），分别标注 A、B、C（或分别标注 U1、V1、W1）；而另一个出线端称为该相绕组的末端（又称为该相绕组的尾），分别标注 X、Y、Z（或分别标注 U2、V2、W2）。

绘制相绕组的方法步骤如下。

① 首先确定 A 相绕组的首端 A（一般取 A 相带下的线圈组的首端作为 A 相绕组的首端 A），然后按照所需的并联支路数 a，根据各个线圈组中电流方向，将属于 A 相的各个线圈组连接成所需的并联支路。注意：为了保证各个支路对称，要求各支路的线圈组的数目应相同，并且各支路的线圈组在空间的位置也应相互对称。

例如：如果每相有六个线圈组，从左至右依次编号为 1、2、3、4、5、6。当并联支路数 $a=2$ 时，既可以将 1、2、3 号线圈组作为第一条支路，将 4、5、6 号线圈组作为第二条支路；也可以将 1、3、5 号线圈组作为第一条支路，将 2、4、6 号线圈组作为第二条支路。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}$$

然后根据电机的槽距角 α，按照 A、B、C 三相绕组的首端互差 120°的原则，确定 B 相和 C 相绕组的首端 B 和 C。

③ 根据 B 相和 C 相绕组已经确定的首端 B 和 C。参考 A 相绕组的连接方法，完成 B 相和 C 相绕组的连接。

（7）校核各槽内导体中的电流的正方向

校核各槽内导体中的电流正方向的原则如下。

① 对于相邻的槽，各槽内导体中的电流方向应为同相电流方向相同；异相电流方向相反。即相邻槽内的导体，如果属于同一相绕组，则电流方向应该相同；如果不属于同一相绕组，则电流方向应该相反。

② 对于同一个槽，槽内上、下层导体中的电流方向应为同相电流方向相同；异相电流方向相反。即同一个槽内的上、下层导体，如果属于同一相绕组，则电流方向应该相同；如果不属于同一相绕组，则电流方向应该相反。

2.3.3 三相单层链式绕组展开图的绘制

【例 2-15】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$、极数 $2p=6$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带的三相单层链式绕组展开图。

解 （1）画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数 $Z_1=36$ 画出 36 个槽，并从左至右编写槽号。

（2）分极距

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$ 计算出电机的极距 τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{36}{6}=6$$

然后根据电机的极距 $\tau=6$，将定子槽数分为 6 个极距，并依次标注 N1、S1、N2、S2、N3、S3，如图 2-34 所示。

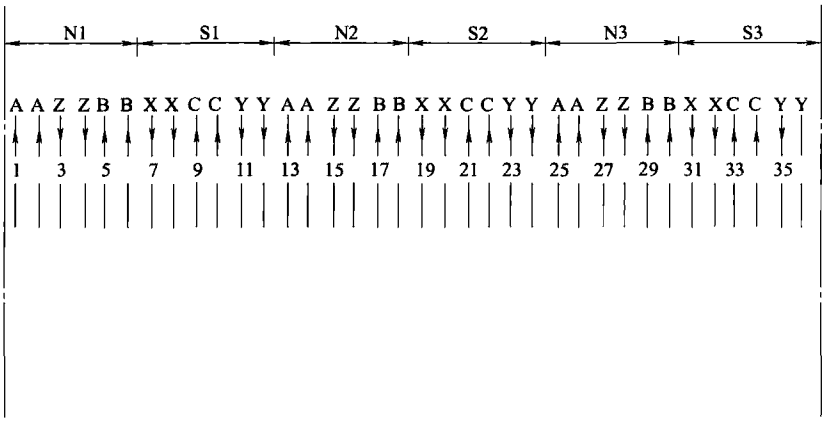


图 2-34　36 槽 6 极电机定子槽的分布

（3）分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的每极每相槽数 q

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{6\times3}=2$$

然后根据电机的每极每相槽数 $q=2$，将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 $m=3$ 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……（见图 2-34）。

（4）标注电流的正方向

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向。对于单层绕组，标注电流正方向的原则是：相邻槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反（见图 2-34）。

（5）绘制线圈和线圈组

按照单层链式绕组的特点，根据槽内导体的电流方向，将某一个极距内的导体与相邻的（一侧或两侧）异性磁极内属于同一相的导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以 A 相为例：将 S 极下 X 相带内的两个槽（7 号槽和 8 号槽）的导体分别与两侧相邻的 N 极下的 A 相带内的导体组成两个线圈（7 号槽内的导体与 2 号槽内的导体组成一个线圈，8 号槽内的导体与 13 号槽内的导体组成一个线圈）；以此类推，将另外两个 S 极下的 X 相带内的导体分别与各自两侧相邻的 N 极下 A 相带内的导体组

成四个线圈（19 与 14 号槽；20 与 25 号槽；31 与 26 号槽；32 与 1 号槽），如图 2-35 所示。本例中，由于每极每相槽数 $q=2$，所以当绘制单层链式绕组时，每个线圈组由 $\frac{q}{2}=1$ 个线圈组成，即一个线圈为一个线圈组。由图 2-35 可知，A 相共有六个线圈组。

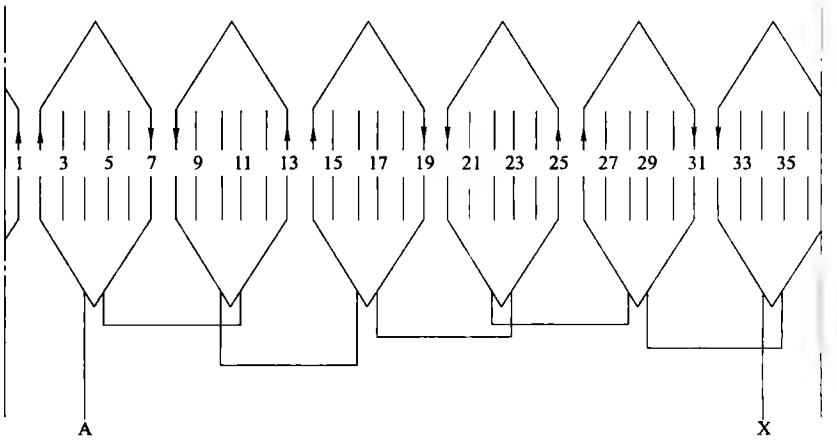


图 2-35 三相单层链式 A 相绕组展开图

（$2p=6$，$Z_1=36$，$a=1$，$y-1$ 6）

（6）绘制相绕组

绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接成一相绕组。由于本例中，每相有六个线圈组，每个线圈组的线圈个数和线圈的节距均相同，为了保证各条支路对称，分别可以组成 $a=1$、$a=2$、$a=3$、$a=6$ 四种。

① 首先确定 A 相绕组的首端 A（一般取 A 相带下的线圈组的首端作为 A 相绕组的首端 A，本例题从 2 号槽引出的线圈出线端作为 A 相绕组的首端 A），然后按照所需的并联支路数 $a=1$，根据各个线圈组中电流方向，将属于 A 相的各个线圈组连接成一条支路，如图 2-35 所示。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{3\times 360^\circ}{36}=30^\circ$$

然后根据电机的槽距角 α，按照 A、B、C 三相绕组的首端互差 120°的原则，确定 B 相和 C 相绕组的首端 B 和 C。因为 $\frac{120^\circ}{30^\circ}=4$，所以 B 相绕组的首端应与 A 相绕组的首端相隔 4 个槽，故 B 相绕组的首端应从 6 号槽引出。同理，C 相绕组的首端应与 B 相绕组的首端相隔 4 个槽，故 C 相绕组的首端应从 10 号槽引出。

③ 根据 B 相和 C 相绕组已经确定的首端 B 和 C。参考 A 相绕组的连接方法，完成 B 相和 C 相绕组的连接，如图 2-36 所示。

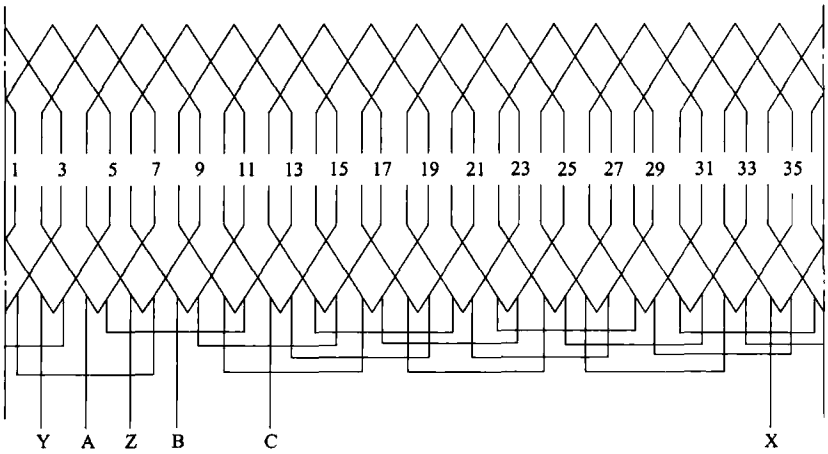


图 2-36　三相单层链式绕组展开图

（$2p=6$，$Z_1=36$，$a=1$，$y=1-6$）

【例 2-16】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$、极数 $2p=6$，试分别绘制并联支路数 $a=2$、60°相带的三相单层链式绕组展开图。

解　由于本例题与【例 2-15】单层链式绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，仅绕组的并联支路数 a 不同，所以每相绕组的分布与图 2-35 和图 2-36 相同。但是，各线圈组之间的连接有所不同。为了保证每条支路对称，则应保证每条支路的线圈数目相同，并且在空间对称分布。对于本例题，由于每相有六个线圈组，而且各线圈组的节距相同，所以最多可以连接成六条支路。

三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=6$，并联支路数 $a=2$，60°相带的三相单层链式绕组的展开图如图 2-37 所示。

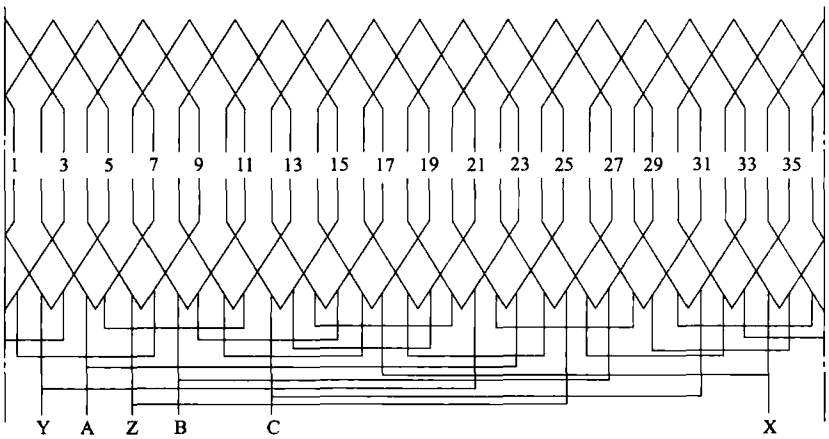


图 2-37　三相单层链式绕组展开图

（$2p=6$，$Z_1=36$，$a=2$，$y=1-6$）

2.3.4 三相单层同心式绕组展开图的绘制

【例 2-17】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$、极数 $2p=6$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带的三相单层同心式绕组展开图。

解 由于本例题与【例 2-15】具有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，所以分极距、分相、标注电流正方向的方法与【例 2-15】相同，如图 2-34 所示。下面重点介绍绘制线圈、线圈组和相绕组。

（1）绘制线圈和线圈组

按照单层同心式绕组的特点，根据槽内导体的电流方向，将某一个极距内的导体与相邻的（一侧或两侧）极距内属于同一相的导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以 A 相为例：将 N 极下 A 相带内的两个槽（1 号槽和 2 号槽）的导体分别与右侧相邻的 S 极下的 X 相带内的导体组成两个线圈（1 号槽内的导体与 8 号槽内的导体组成一个大线圈，2 号槽内的导体与 7 号槽内的导体组成一个小线圈）；以此类推，将另外两个 N 极下的 A 相带内的导体分别与各自右侧相邻的 S 极下 X 相带内的导体组成四个线圈（13 与 20 号槽；14 与 19 号槽；25 与 32 号槽；26 与 31 号槽），如图 2-38 所示。

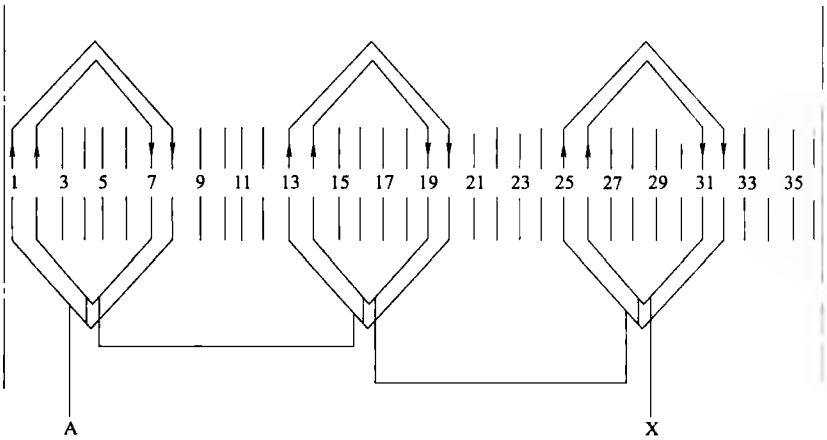


图 2-38 三相单层同心式绕组中 A 相绕组展开图

$\left(2p=6,\ Z_1=36,\ a=1,\ y=\begin{matrix}1 & 8\\ 2 & 7\end{matrix}\right)$

对于单层同心式绕组，当将某一个极距内的导体与两侧相邻的极距内属于同一相的导体分别连接成线圈，每个线圈组的线圈个数一般为 $\frac{q}{2}$；当将某一个极距内的导体与一侧相邻的极距内属于同一相的导体连接成线圈，每个线圈组的线圈个数一般为 q。本例中，由于是将 N 极下 A 相带内的两个槽（1 号槽和 2 号槽）的导体分别与右侧相邻的 S 极距下的 X 相带内的导体组成两个线圈，又因为每极每相槽数 $q=2$，所

以当绘制单层同心式绕组时，每个线圈组由 2 个线圈（一个大线圈、一个小线圈）构成。由图 2-38 可知，A 相共有三个线圈组。

（2）绘制相绕组

绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接成一相绕组。由于本例中，每相有三个线圈组，每个线圈组的线圈个数和线圈的节距均分别相同，为了保证各条支路对称，分别可以组成 $a=1$ 和 $a=3$ 两种。

① 首先确定 A 相绕组的首端 A（一般取 A 相带下的线圈组的首端作为 A 相绕组的首端 A，本例题从 1 号槽引出的线圈出线端作为 A 相绕组的首端 A），然后按照所需的并联支路数 $a=1$，根据各个线圈组中电流方向，将属于 A 相的各个线圈组连接成一条支路，如图 2-38 所示。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{3\times 360^\circ}{36}=30^\circ$$

然后根据电机的槽距角 α，按照 A、B、C 三相绕组的首端互差 120°的原则，确定 B 相和 C 相绕组的首端 B 和 C。因为 $\frac{120^\circ}{30^\circ}=4$，所以 B 相绕组的首端应与 A 相绕组的首端相隔 4 个槽，故 B 相绕组的首端应从 5 号槽引出。同理，C 相绕组的首端应与 B 相绕组的首端相隔 4 个槽，故 C 相绕组的首端应从 9 号槽引出。

③ 根据 B 相和 C 相绕组已经确定的首端 B 和 C。参考 A 相绕组的连接方法，完成 B 相和 C 相绕组的连接，如图 2-39 所示。

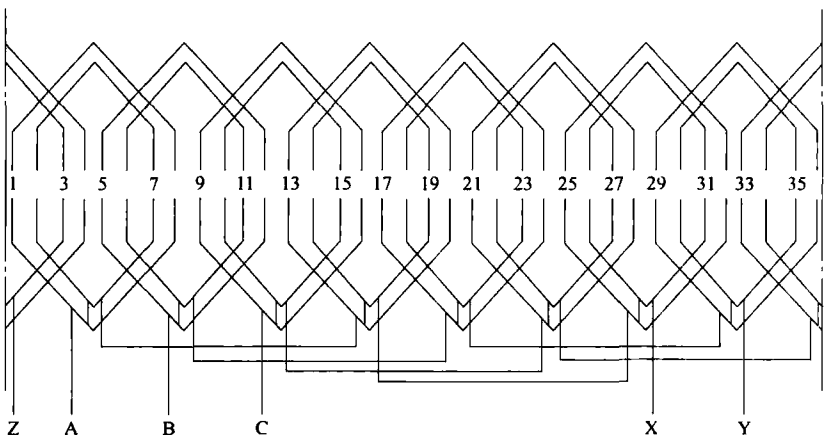


图 2-39　三相单层同心式绕组展开图

$\left(2p=6,\ Z_1=36,\ a=1,\ y=\frac{1}{2}\cdot\frac{8}{7}\right)$

【例 2-18】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$、极数 $2p=6$，试分别绘制并联支路数 $a=3$、60°相带的三相单层同心式绕组展开图。

解 由于本例题与【例 2-17】单层同心式绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，仅绕组的并联支路数 a 不同，所以每相绕组的分布与图 2-38 相同。但是，各线圈组之间的连接有所不同。为了保证每条支路对称，则应保证每条支路的线圈数目相同，并且在空间对称分布。对于本例题，由于每相有三个线圈组，而且各线圈组的节距分别相同，所以最多可以连接成三条支路。

三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$、极数 $2p=6$，并联支路数 $a=3$、60°相带的三相单层同心式绕组的展开图如图 2-40 所示。

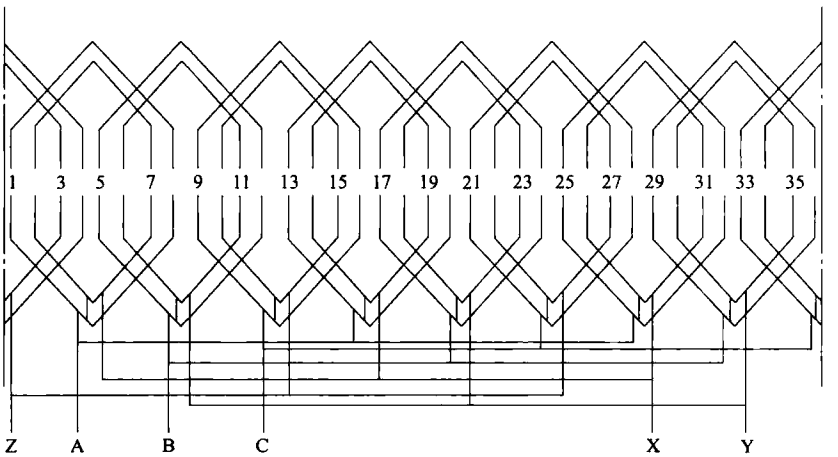


图 2-40 三相单层同心式绕组展开图

$\left(2p=6,\ Z_1=36,\ a=3,\ y=\begin{matrix}1 & 8\\ 2 & 7\end{matrix}\right)$

2.3.5 三相单层交叉式绕组展开图的绘制

【例 2-19】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$、极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带的三相单层交叉式绕组展开图。

解 (1) 画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数 $Z_1=36$ 画出 36 个槽，并从左至右编写槽号。

(2) 分极距

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$ 计算出电机的极距 τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{36}{4}=9$$

然后根据电机的极距 $\tau=9$，将定子槽数分为 4 个极距，并依次标注 N1、S1、N2、S2，如图 2-41 所示。

(3) 分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的每极每相槽数 q

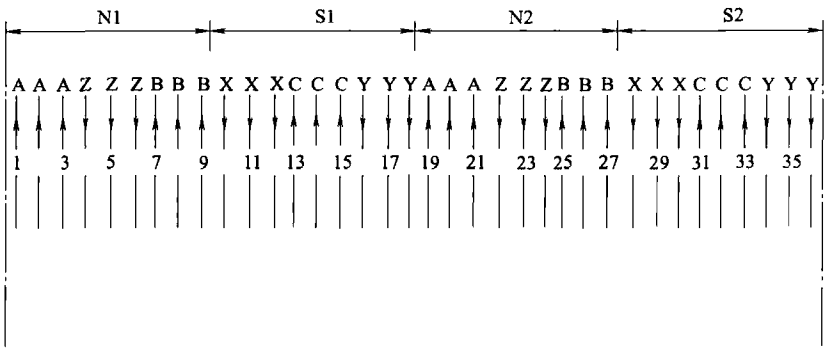


图 2-41　36 槽 4 极电机定子槽的分布

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{4\times3}=3$$

然后根据电机的每极每相槽数 $q=3$，将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 $m=3$ 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……（见图 2-41）。

（4）标注电流的正方向

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向。对于单层绕组，标注电流正方向的原则是：相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反（见图 2-41）。

（5）绘制线圈和线圈组

单层交叉式绕组一般适用于每极每相槽数 $q=3$ 的三相绕组中。按照单层交叉式绕组的特点，根据槽内导体的电流方向，将某一个极距内的导体与两侧相邻的极距内属于同一相的导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。由于每极每相槽数 $q=3$，所以一侧为两个槽（构成两个大线圈），另一侧为一个槽（构成一个小线圈）。

以 A 相为例：将 S 极下 X 相带内的三个槽（10 号槽、11 号槽和 12 号槽）的导体分别与两侧相邻的 N 极下的 A 相带内的导体组成两个线圈组（10 号槽内的导体与 2 号槽内的导体组成一个大线圈，11 号槽内的导体与 3 号槽内的导体组成一个大线圈；12 号槽内的导体与 19 号槽内的导体组成一个小线圈）；以此类推，将另外一个 S 极下的 X 相带内的导体分别与各自两侧相邻的 N 极下 A 相带内的导体组成两个线圈组（28 与 20 号槽、29 与 21 号槽构成两个大线圈；30 与 1 号槽构成一个小线圈），如图 2-42 所示。由图 2-42 可知，A 相共有四个线圈组，其中有两个大线圈组、两个小线圈组。

（6）绘制相绕组

绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接成一相绕组。由于本例中，每相有四个线圈组，其中，两个大线圈组的线圈个数和线圈的节距均相同，两个小线圈组的线圈个数和线圈的节距相同。为了保证各条支路对称，所以最多可以

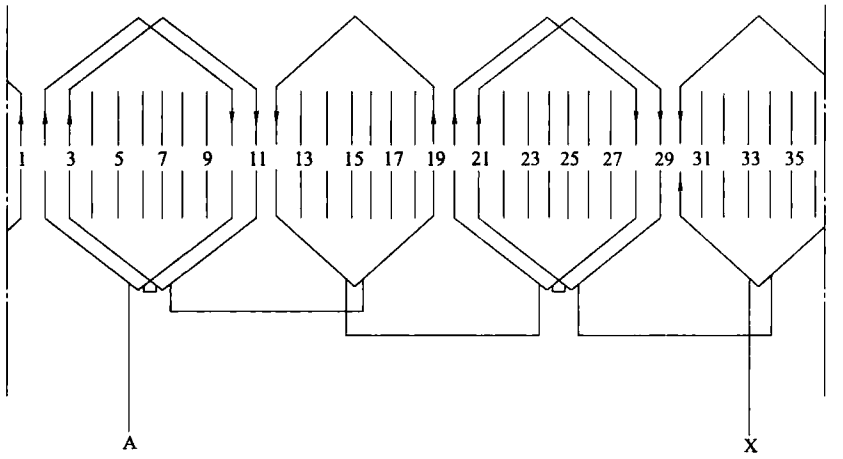


图 2-42　三相双层交叉式绕组中 A 相绕组展开图

$\left(2p=4,\ Z_1=36,\ a=1,\ y=\begin{matrix}2/1 & 9\\ 1/1 & -8\end{matrix}\right)$

连接成两条支路。即分别可以组成 $a=1$ 和 $a=2$ 两种并联支路。

① 首先确定 A 相绕组的首端 A（一般取 A 相带下的线圈组的首端作为 A 相绕组的首端 A，本例题从 2 号槽引出的线圈出线端作为 A 相绕组的首端 A），然后按照所需的并联支路数 $a=1$，根据各个线圈组中电流方向，将属于 A 相的各个线圈组连接成一条支路，如图 2-42 所示。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times 360^\circ}{36}=20^\circ$$

然后根据电机的槽距角 α，按照 A、B、C 三相绕组的首端互差 120°的原则，确定 B 相和 C 相绕组的首端 B 和 C。因为 $\frac{120^\circ}{20^\circ}=6$，所以 B 相绕组的首端应与 A 相绕组的首端相隔 6 个槽，故 B 相绕组的首端应从 8 号槽引出。同理，C 相绕组的首端应与 B 相绕组的首端相隔 6 个槽，故 C 相绕组的首端应从 14 号槽引出。

③ 根据 B 相和 C 相绕组已经确定的首端 B 和 C。参考 A 相绕组的连接方法，完成 B 相和 C 相绕组的连接，如图 2-43 所示。

【例 2-20】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$、极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=2$、60°相带的三相单层交叉式绕组展开图。

解　由于本例题与【例 2-19】单层交叉式绕组有相同的定子槽数 Z_1 和极数 $2p$，仅绕组的并联支路数 a 不同，所以每相绕组的分布与图 2-41 相同。但是，各线圈组之间的连接有所不同。为了保证每条支路对称，则应保证每条支路的线圈数目相同，并且在空间对称分布。对于本例题，由于每相有两个大线圈组、两个小线圈组，而且两个大线圈组的节距分别相同，两个小线圈组的节距也分别相同，所以最多可以连接

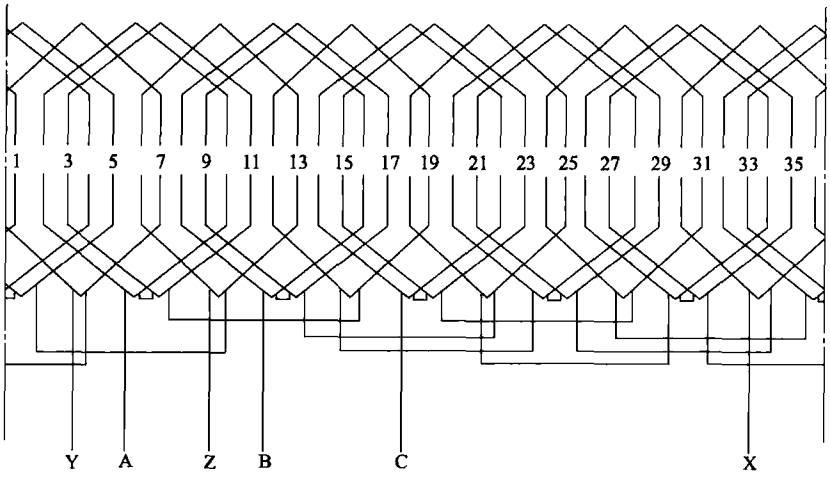


图 2-43　三相双层交叉式绕组展开图

$\left(2p=4,\ Z_1=36,\ a=1,\ y=\begin{matrix}2/1 & 9\\ 1/1 & 8\end{matrix}\right)$

成两条支路（每条支路有一个大线圈组和一个小线圈组）。

三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$、极数 $2p=4$，并联支路数 $a=2$、60°相带的三相单层交叉式绕组的展开图如图 2-44 所示。

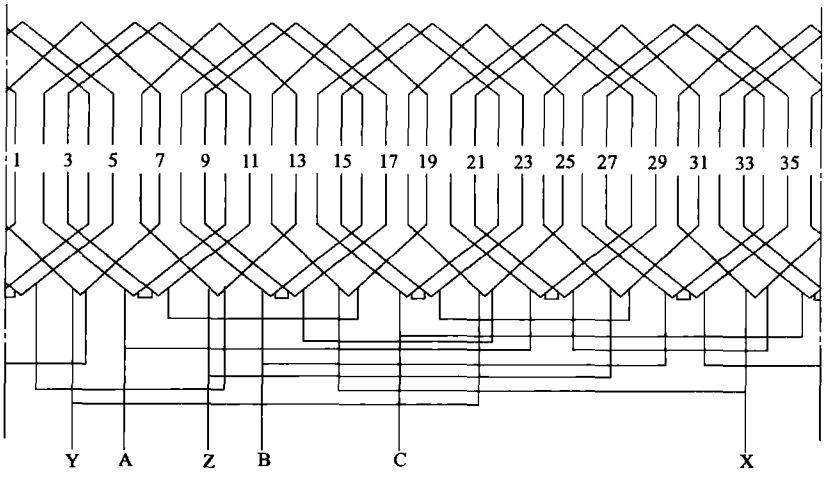


图 2-44　三相单层交叉式绕组展开图

$\left(2p=4,\ Z_1=36,\ a=2,\ y=\begin{matrix}2/1 & -9\\ 1/1 & -8\end{matrix}\right)$

2.3.6　三相双层叠绕组展开图的绘制

【例 2-21】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$、极数 $2p=6$，试绘制一

个并联支路数 $a=1$、60°相带、节距 $y=\frac{5}{6}\tau$ 的三相双层叠绕组展开图。

解 （1）画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数 $Z_1=36$ 画出 36 个槽（每个槽应画出一根实线与一根虚线，分别表示该槽的上层导体与下层导体），并从左至右编写槽号。

（2）分极距

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$ 计算出电机的极距 τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{36}{6}=6$$

然后根据电机的极距 $\tau=6$，将定子槽数分为 6 个极距，并依次标注 N1、S1、N2、S2、N3、S3，如图 2-45 所示。

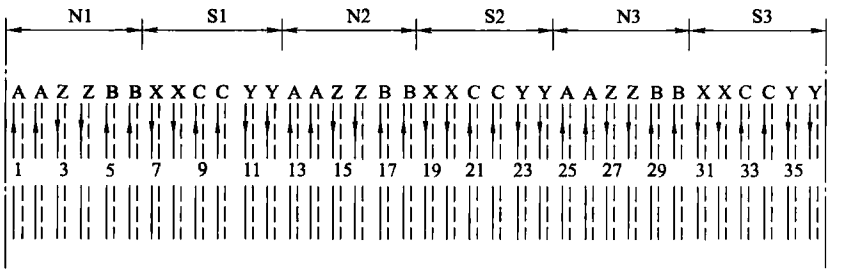


图 2-45　36 槽 6 极电机定子槽的分布

（3）分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的每极每相槽数 q

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{6\times3}=2$$

然后根据电机的每极每相槽数 $q=2$，将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 $m=3$ 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……（见图 2-45）。

（4）标注电流的正方向

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向。对于双层绕组，只标注每个槽内上层导体中电流的正方向。标注电流正方向的原则是：相邻槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反（见图 2-45）。

（5）绘制线圈和线圈组

按照双层叠绕组的特点，根据槽内上层导体的电流方向，将某一个极距内的上层导体与右侧相邻的极距内相距一个节距 $y=\frac{5}{6}\tau=\frac{5}{6}\times6=5$ 的下层导体（无论该下层导体在属于哪一相的槽内）连接成一个线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将

同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以A相为例：将N极下A相带内的两个槽（1号槽和2号槽）的上层导体分别与右侧相邻的S极下相距一个节距 $y=5$ 的下层导体组成两个线圈（1号槽内的上层导体与6号槽内的下层导体组成一个线圈，2号槽内的上层导体与7号槽内的下层导体组成一个线圈）；然后，再将相邻的S极下X相带内的两个槽（7号槽和8号槽）的上层导体分别与右侧相邻的N极下相距一个节距 $y=5$ 的下层导体组成两个线圈（7号槽内的上层导体与12号槽内的下层导体组成一个线圈，8号槽内的上层导体与13号槽内的下层导体组成一个线圈）。以此类推，将另外四个磁极下的A相带（或X相带）内的上层导体分别与各右侧相邻的磁极下相距一个节距 $y=5$ 的下层导体组成八个线圈（13上与18下；14上与19下；19上与24下；20上与25下；25上与30下；26上与31下；31上与36下；32上与1下），如图2-46所示。本例中，由于每极每相槽数 $q=2$，所以当绘制双层叠绕组时，每个线圈组由 $q=2$ 个线圈构成，即两个线圈为一个线圈组。由图2-46可知，A相共有六个线圈组（双层叠绕组中每相线圈组的个数等于电机的极数 $2p$）。

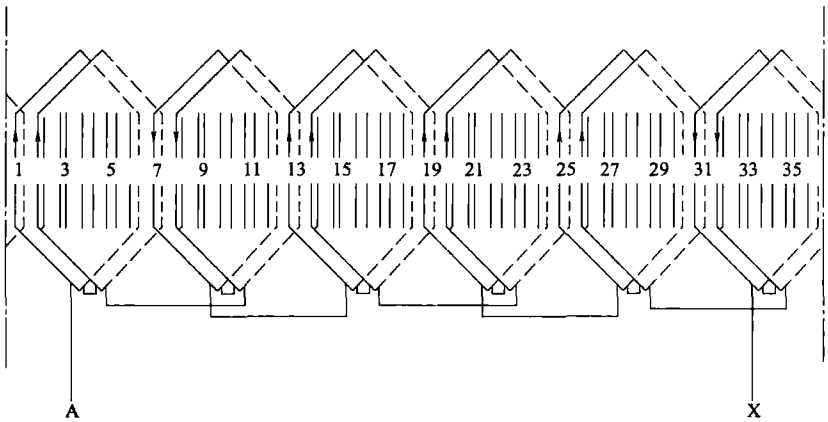


图2-46　三相双层叠绕组中A相绕组展开图

（$2p=6$，$Z_1=36$，$a=1$，$y=1\sim6$）

（6）绘制相绕组

绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接成一相绕组。由于本例中，每相有六个线圈组，每个线圈组的线圈个数和线圈的节距均相同，为了保证各条支路对称，分别可以组成 $a=1$、$a=2$、$a=3$、$a=6$ 四种。

① 首先确定A相绕组的首端A（一般取A相带下的线圈组的首端作为A相绕组的首端A，本例题从1号槽引出的线圈出线端作为A相绕组的首端A），然后按照所需的并联支路数 $a=1$，根据各个线圈组中电流方向，将属于A相的各个线圈组连接成一条支路，如图2-46所示。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times360^\circ}{Z_1}=\frac{3\times360^\circ}{36}=30^\circ$$

然后根据电机的槽距角 α，按照 A、B、C 三相绕组的首端互差 120°的原则，确定 B 相和 C 相绕组的首端 B 和 C。因为 $\frac{120^\circ}{30^\circ}=4$，所以 B 相绕组的首端应与 A 相绕组的首端相隔 4 个槽，故 B 相绕组的首端应从 5 号槽引出。同理，C 相绕组的首端应与 B 相绕组的首端相隔 4 个槽，故 C 相绕组的首端应从 9 号槽引出。

③ 根据 B 相和 C 相绕组已经确定的首端 B 和 C。参考 A 相绕组的连接方法，完成 B 相和 C 相绕组的连接，如图 2-47 所示。

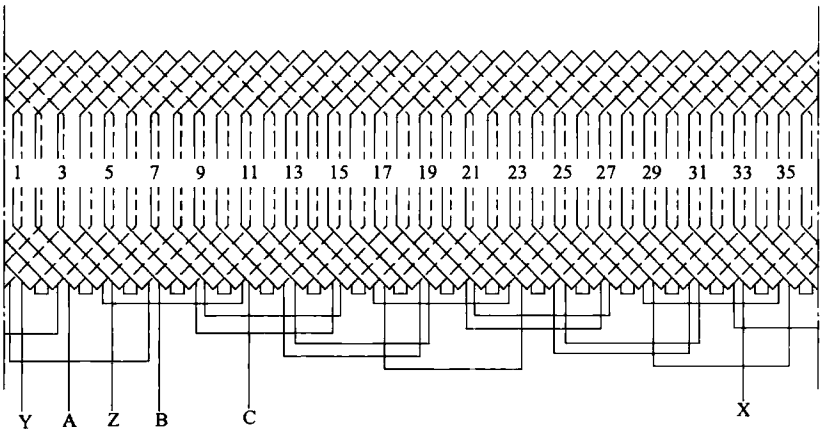


图 2-47 三相双层叠绕组展开图

（$2p=6$，$Z_1=36$，$a=1$，$y=1-6$）

2.4 三相异步电机定子绕组展开图识读实例

2.4.1 三相异步电机定子绕组展开图识读方法步骤

识读三相异步电机定子绕组展开图的方法步骤如下。

（1）观察线圈的节距，判断电机的极数

电机定子绕组的节距 y 一般近似等于电机的极距 τ（普通三相异步电机 $y\leqslant\tau$），电机的极数 $2p=\frac{Z_1}{\tau}$。所以，根据电机定子的槽数 Z_1 和定子绕组的节距 y，就可以估

算出电机的极数，然后取接近的整数（而且还应该是偶数）。

例如：一台三相异步电机，定子槽数 $Z_1=36$，线圈的节距 $y=8$（如线圈的一个边在 1 号槽，另一个边在 9 号槽，又称跨距为 1—9），则该电机的极数 $2p=\frac{Z_1}{\tau}\approx\frac{Z_1}{y}=\frac{36}{8}=4.5$，故该电机的极数 $2p$ 为 4（取近似的整数，并且应该取偶数）。

（2）观察槽内线圈边的个数，判断绕组的层数

如果电机定子铁芯的每一个槽内均只有一个线圈边，则该电机的绕组就是单层绕组；如果电机定子铁芯的每一个槽内均有两个线圈边，则该电机的绕组就是双层绕组；如果电机定子铁芯中有的槽内只有一个线圈边，而有的槽内有两个线圈边，则该电机的绕组就是单双层绕组。

（3）计算每极每相槽数 q

根据电机的相数 m、定子的槽数 Z_1，计算电机定子绕组的每极每相槽数 q

对于 60°相带的绕组

$$q=\frac{Z_1}{2pm}$$

对于 120°相带的绕组

$$q=\frac{Z_1}{pm}$$

一般情况下，普通三相异步电机常采用 60°相带的绕组，变极多速三相异步电机一般少极数常采用 60°相带的绕组，多极数常采用 120°相带的绕组。

如果每极每相槽数 q 为整数，则为整数槽绕组；如果每极每相槽数 q 不是整数，则为分数数槽绕组。普通三相异步电机常采用整数槽绕组。

（4）根据线圈的结构特点，判断绕组的形式

① 对于单层绕组

a. 当 $q=2$ 时，如果每个线圈组由一个线圈构成，则为单层链式绕组；如果每个线圈组由两个线圈（一个大线圈和一个小线圈）构成，小线圈外套大线圈，则为单层同心式绕组；如果每个线圈组由两个线圈（两个线圈的节距相同）构成，则为单层等元件式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=2$ 时，多数情况下采用单层链式绕组，有时也采用单层同心式绕组。

b. 当 $q=3$ 时，如果每个线圈组由三个线圈（一个大线圈、一个中线圈和一个小线圈）构成，小线圈外套中线圈，而中线圈外套大线圈，则为单层同心式绕组；如果有的线圈组由两个节距大的线圈构成，有的线圈组由一个节距小的线圈构成，则为单层交叉式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=3$ 时，多数情况下采用单层交叉式绕组。

c. 当 $q=4$ 时，如果每个线圈组由两个线圈（一个大线圈和一个小线圈）构成，小线圈外套大线圈，而且每相绕组线圈组的个数等于电机的极数 $2p$，则为单层同心

式绕组；如果线圈组由四个节距相同的线圈构成，则为单层等元件式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=4$ 时，多数情况下采用单层同心式绕组。

d. 当 $q=5$ 时，如果有的线圈组由三个线圈（一个大线圈、一个中线圈和一个小线圈）构成，小线圈外套中线圈，而中线圈外套大线圈，而有的线圈组由两个线圈（一个大线圈和一个小线圈）构成，小线圈外套大线圈，而且每相绕组线圈组的个数等于电机的极数 $2p$，则为单层同心式绕组；如果线圈组由五个节距相同的线圈构成，则为单层等元件式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=5$ 时，多数情况下采用单层同心式绕组。

e. 当 $q=6$ 时，如果每个线圈组均由三个线圈（一个大线圈、一个中线圈和一个小线圈）构成，小线圈外套中线圈，而中线圈外套大线圈，而且每相绕组的线圈组的个数等于电机的极数 $2p$，则为单层同心式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=6$ 时，多数情况下采用单层同心式绕组。

② 对于双层绕组

a. 注意观察每个线圈的两个出线端。如果线圈的两个出线端向该线圈的轴线（中心线）合拢，则为双层叠绕组；如果线圈的两个出线端向该线圈的两侧分开，则为双层波绕组。

b. 注意比较线圈的节距 y 和极距 τ。如果 $y<\tau$，则为双层短距绕组；如果 $y=\tau$，则为双层整距绕组；如果 $y>\tau$，则为双层长距绕组。普通三相异步电机常采用双层短距绕组。

(5) 根据每相绕组中各个线圈组之间的连接，判断绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，通常以该相绕组的首端 A 开始观察，如果从 A 端开始，依次将 A 相绕组的全部线圈组串联成一条支路，则电机的并联支路数 $a=1$；如果从 A 端开始，将 A 相绕组的全部线圈组分成两条支路，则电机的并联支路数 $a=2$；以此类推。

2.4.2 三相异步电机常用定子绕组展开图识读实例

【例 2-22】 已知一台三相异步电机的定子绕组展开图如图 2-48 所示，试判断该电机定子绕组的形式、极数 $2p$、极距 τ、节距 y 和并联支路数 a。

解

(1) 电机的极数

因为定子槽数 $Z_1=48$，线圈的节距 $y=5$（跨距为 1—6），则该电机的极数 $2p=\frac{Z_1}{\tau}\approx\frac{Z_1}{y}=\frac{48}{5}=9.6$，近似的偶数为 8 或 10。因为除变极多速电机外，一般电机的定子绕组多为短距或整距绕组（$y\leqslant\tau$），所以，极数 $2p$ 应取较小的偶数，故该电机的极数 $2p$ 为 8。因此，该电机的极距 τ 为

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{48}{8}=6$$

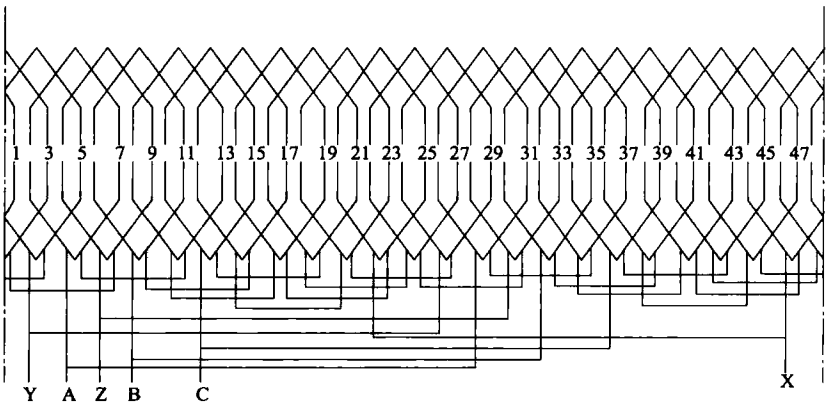


图 2-48　三相单层链式绕组展开图

（$2p=8$，$Z_1=48$，$a=2$，$y=1-6$）

（2）绕组的层数

因为电机定子铁芯的每一个槽内均只有一个线圈边，所以该电机的绕组就是单层绕组。

（3）计算每极每相槽数 q

因为除变极多速电机外，一般电机的定子绕组多为 60°相带的绕组。根据电机的相数 m、定子的槽数 Z_1，计算电机定子绕组的每极每相槽数 q，对于 60°相带的绕组

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{48}{8\times3}=2$$

（4）绕组的形式

因为，该电机定子绕组的每极每相槽数 $q=2$，而每个线圈组由一个线圈构成，所以该绕组为单层链式绕组。

（5）绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，从该相绕组的首端 A 开始观察，电机的并联支路数 $a=2$，其中，一条支路进入 1 号槽，另一条支路进入 25 号槽。每条支路均由四个线圈构成。

【例 2-23】 已知一台三相异步电机的定子绕组展开图如图 2-49 所示，试判断该电机定子绕组的形式、极数 $2p$、极距 τ、节距 y 和并联支路数 a。

解

（1）电机的极数

因为定子槽数 $Z_1=54$，两个大线圈的节距 $y=8$（跨距为 1—9、2—10），一个小线圈的节距 $y=7$（跨距为 11—18），其平均节距为 $y=\frac{8\times2+7\times1}{3}\approx7.7$。则该电机的极数 $2p=\frac{Z_1}{\tau}\approx\frac{Z_1}{y}=\frac{54}{7.7}=7.01$，近似的偶数为 6 或 8。因为除变极多速电机外，一

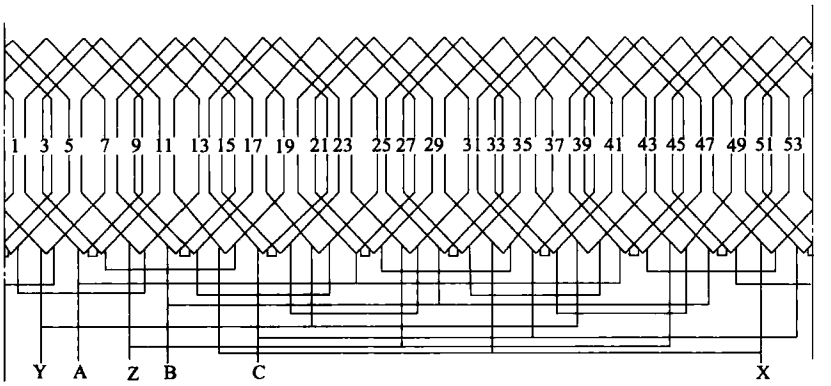


图 2-49 三相单层交叉式绕组展开图

$\left(2p=6,\ Z_1=54,\ a=3,\ y=\begin{matrix}2/1--9\\1/1\quad 8\end{matrix}\right)$

般电机的定子绕组多为短距或整距绕组（$y\leqslant\tau$），所以，极数 $2p$ 应取较小的偶数，故该电机的极数 $2p$ 为 6。因此，该电机的极距 τ 为

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{54}{6}=9$$

（2）绕组的层数

因为电机定子铁芯的每一个槽内均只有一个线圈边，所以该电机的绕组就是单层绕组。

（3）计算每极每相槽数 q

因为除变极多速电机外，一般电机的定子绕组多为 60°相带的绕组。根据电机的相数 m、定子的槽数 Z_1，计算电机定子绕组的每极每相槽数 q，对于 60°相带的绕组

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{54}{6\times 3}=3$$

（4）绕组的形式

因为，该电机定子绕组的每极每相槽数 $q=3$，有的线圈组由两个节距大的线圈构成，有的线圈组由一个节距小的线圈构成，所以该绕组为单层交叉式绕组。

（5）绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，从该相绕组的首端 A 开始观察，电机的并联支路数 $a=3$，其中，第一条支路进入 1 号槽，第二条支路进入 19 号槽，第三条支路进入 37 号槽。每条支路均由两个大线圈和一个小线圈构成。

【例 2-24】 已知一台三相异步电机的定子绕组展开图如图 2-50 所示，试判断该电机定子绕组的形式、极数 $2p$、极距 τ、节距 y 和并联支路数 a。

解

（1）电机的极数

因为定子槽数 $Z_1=36$，一个大线圈的节距 $y=17$（跨距为 1—18），一个中线圈

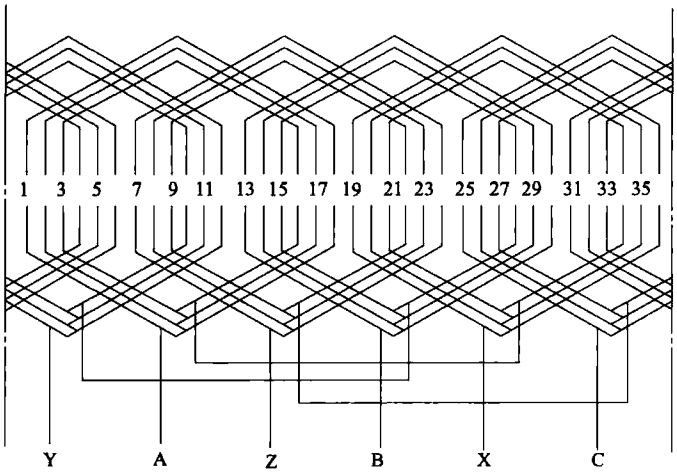


图 2-50　三相单层同心式绕组展开图

$$\left(2p=2,\ Z_1=36,\ a=1,\ y=\begin{matrix}1-18\\2-17\\3-16\end{matrix}\right)$$

的节距 $y=15$（跨距为 2—17），一个小线圈的节距 $y=13$（跨距为 3—16），其平均节距为 $y=\dfrac{17+15+13}{3}=15$。则该电机的极数 $2p=\dfrac{Z_1}{\tau}\approx\dfrac{Z_1}{y}=\dfrac{36}{15}=2.4$，近似的偶数为 2 或 4。因为除变极多速电机外，一般电机的定子绕组多为短距或整距绕组（$y\leqslant\tau$），所以，极数 $2p$ 应取较小的偶数，故该电机的极数 $2p$ 为 2。因此，该电机的极距 τ 为

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{36}{2}=18$$

（2）绕组的层数

因为电机定子铁芯的每一个槽内均只有一个线圈边，所以该电机的绕组就是单层绕组。

（3）计算每极每相槽数 q

因为除变极多速电机外，一般电机的定子绕组多为 60°相带的绕组。根据电机的相数 m、定子的槽数 Z_1，计算电机定子绕组的每极每相槽数 q，对于 60°相带的绕组

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{2\times3}=6$$

（4）绕组的形式

因为，该电机定子绕组的每极每相槽数 $q=6$，每个线圈组均由三个线圈（一个大线圈、一个中线圈和一个小线圈）构成，小线圈外套中线圈，而中线圈外套大线圈，而且每相绕组的线圈组的个数等于电机的极数 $2p$，所以该绕组为单层同心式

绕组。

(5) 绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，从该相绕组的首端 A 开始观察，电机的并联支路数 $a=1$，A 相电源直接进入 1 号槽，构成了一条支路。

【例 2-25】 已知一台三相异步电机的定子绕组展开图如图 2-51 所示，试判断该电机定子绕组的形式、极数 $2p$、极距 τ、节距 y 和并联支路数 a。

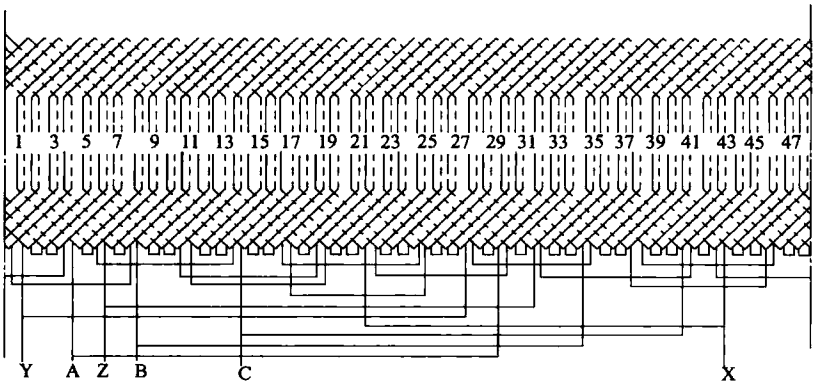


图 2-51 三相双层叠绕组展开图

($2p=6$，$Z_1=48$，$a=2$，$y=1—8$)

解

(1) 电机的极数

因为定子槽数 $Z_1=48$，每个线圈的节距 $y=7$（跨距为 1—8）。则该电机的极数 $2p=\dfrac{Z_1}{\tau}\approx\dfrac{Z_1}{y}=\dfrac{48}{7}=6.86$，近似的偶数为 6 或 8。因为除变极多速电机外，一般电机的定子绕组多为短距或整距绕组（$y\leqslant\tau$），所以，极数 $2p$ 应取较小的偶数，故该电机的极数 $2p$ 为 6。因此，该电机的极距 τ 为

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{48}{6}=8$$

(2) 绕组的层数

因为电机定子铁芯的每一个槽内均有一个上层线圈边和一个下层线圈边，所以该电机的绕组就是双层层绕组。

(3) 计算每极每相槽数 q

因为除变极多速电机外，一般电机的定子绕组多为 60°相带的绕组。根据电机的相数 m、定子的槽数 Z_1，计算电机定子绕组的每极每相槽数 q，对于 60°相带的绕组

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{48}{6\times3}=2\frac{2}{3}$$

因为 q≠整数，所以该电机为分数槽绕组。每相在有的磁极下 $q=3$，而在有的磁极下 $q=2$。

（4）绕组的形式

观察每个线圈的两个出线端，因为每个线圈的两个出线端向该线圈的轴线（中心线）合拢，所以，该绕组为双层叠绕组。

该电机线圈的节距 $y=7$，极距 $\tau=8$。因为 $y<\tau$，所以该电机的绕组为双层短距绕组。

（5）绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，从该相绕组的首端 A 开始观察，电机的并联支路数 $a=2$，其中，A 相电源一路由 1 号槽的上层边进入，另一路由 33 号槽的下层边进入，每条支路的线圈组的个数均为三个（其中，两个线圈组中的线圈数目为 3，一个线圈组中的线圈数目为 2）。

第3章

三相异步电机定子绕组端部布线图

3.1 定子绕组端部布线图的特点和绘制方法 / 71
3.2 三相单层绕组端部布线图的绘制 / 74
3.3 三相双层叠绕组端部布线图的绘制 / 83
3.4 三相异步电机常用定子绕组端部布线图实例 / 86

3.1 定子绕组端部布线图的特点和绘制方法

3.1.1 定子绕组端部布线图的特点

三相异步电机定子绕组端部布线图（又称定子绕组端视图）重点描述的是三相绕组中各个极相组（线圈组）之间的连接方法，以及各相绕组首末端引出线的位置等。定子绕组端部布线图的主要特点如下。

① 定子绕组端部布线图直观，易于识读。

② 定子绕组端部布线图的形状为一个圆环，该圆环由定子槽和各个线圈的端接部分构成。

③ 在单层绕组端部布线图中，每一个定子槽用一个“○”表示，全部定子槽围成一个大圆圈；在双层绕组端部布线图中，每一个定子槽用两个“○”表示，全部定子槽围成两个圆圈（一个小圆圈和一个大圆圈），而且两个圆圈同心，其中小圆圈中的各个“○”表示各定子槽的上层，大圆圈中的各个“○”表示各定子槽的下层。在双层绕组中，每个线圈的一个有效边位于定子槽的上层，另一个有效边位于定子槽的下层。

④ 定子绕组端部布线图中，各个线圈的端接部分分别绘制成一段圆弧（或绘制成一端折线），即每一段圆弧代表一个线圈。

⑤ 利用定子绕组端部布线图，可以了解各个线圈的节距（即线圈的跨距）。

⑥ 利用定子绕组端部布线图，可以了解该电机极数 $2p$、定子绕组有多少个极相组（线圈组）以及各个极相组（线圈组）之间的连接规律。

⑦ 利用定子绕组端部布线图，还可以了解该电机定子绕组的并联支路数 a 以及各相绕组首末端引出线的位置。

⑧ 利用定子绕组端部布线图，可以了解各个极相组（线圈组）所包含的线圈号（或线圈上层边所在的槽号）。

3.1.2 定子绕组端部布线图的绘制方法

由于三相异步电机定子绕组端部布线图重点描述的是三相绕组中各个线圈的节距、各个极相组（线圈组）之间的连接方法，以及各相绕组首末端引出线的位置等。所以绘制定子绕组端部布线图的方法步骤与绘制定子绕组展开图的方法步骤基本相同，利用定子电流正方向绘制定子绕组端部布线图的方法步骤如下。

（1）画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数 Z_1 画出 Z_1 个槽（单层绕组绘制 Z_1 个“○”，围

成一个大圆圈；双层绕组需要用“○”围成一个小圆圈和一个大圆圈，每一个圆圈均由 Z_1 个“○”个围成），并逆时针（或顺时针）编写槽号。

（2）分极距

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$ 计算出电机的极距 τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}$$

然后根据电机的极距将定子槽数分为 $2p$ 个极距，并依次标注 N1、S1、N2、S2……

（3）分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的每极每相槽数 q

$$q=\frac{Z_1}{2pm}$$

然后根据电机的每极每相槽数 q 将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 m 相；对于 120°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每对极距内的定子槽分为 m 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……或用不同颜色将分别属于三相的槽予以区分。

（4）标注电流的正方向

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向（其中“⊗”表示电流流入线圈；“⊙”表示电流流出线圈）。标注电流正方向的原则是：

① 对于单层绕组，相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反；

② 对于双层绕组，只标注各槽内上层导体的电流的正方向，标注方法与单层绕组的标注方法相同，即，相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反。

（5）绘制线圈和线圈组

绘制线圈和线圈组的方法如下。

① 对于单层绕组，按照所需的绕组形式（如同心式、交叉式、链式等）的特点，根据槽内导体的电流方向，将某一个极距内的导体与相邻的（一侧或两侧）极距内属于同一相的导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以 A 相为例：将 A 相带内的导体分别与相邻的（一侧或两侧）极距下的 X 相带内的导体组成线圈；或将 X 相带内的导体分别与相邻的（一侧或两侧）极距下的 A 相带内的导体组成线圈。然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于 A 相的线圈串联成线圈组。

② 对于双层绕组，按照所需的绕组形式（如叠绕组、波绕组等）的特点，根据槽内上层导体的电流方向，将某一个极距内的定子槽内的上层导体与相邻极距内相距一个节距 y 的槽内的下层导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以A相为例：将A相带内的定子槽内的上层导体与相邻极距内相距一个节距 y 的槽内的下层导体连接成线圈；并将X相带内的定子槽内的上层导体与相邻极距内相距一个节距 y 的槽内的下层导体连接成线圈。然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于A相的线圈串联成线圈组。

(6) 绘制相绕组

已经连接成的线圈组，具有两个出线端，一般沿定子内圆逆时针方向绕行，分别先后经过每一个线圈组的两侧，把先经过的那一侧的出线端称为线圈组的首端（又称为线圈组的头）；而把后经过的那一侧的出线端称为线圈组的末端（又称为线圈组的尾）。绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接起来，构成相绕组。构成的每相绕组都有两个出线端，一个出线端称为该相绕组的首端（又称为该相绕组的头），分别标注A、B、C（或分别标注U1、V1、W1）；而另一个出线端称为该相绕组的末端（又称为该相绕组的尾），分别标注X、Y、Z（或分别标注U2、V2、W2）。

绘制相绕组的方法步骤如下。

① 首先确定A相绕组的首端A（一般取A相带下的线圈组的首端作为A相绕组的首端A），然后按照所需的并联支路数 a，根据各个线圈组中电流方向，将属于A相的各个线圈组连接成所需的并联支路。注意：为了保证各个支路对称，要求各支路的线圈组的数目应相同，并且各支路的线圈组在空间的位置也应相互对称。

例如：如果每相有六个线圈组，从左至右依次编号为1、2、3、4、5、6。当并联支路数 $a=2$ 时，既可以将1、2、3号线圈组作为第一条支路，将4、5、6号线圈组作为第二条支路；也可以将1、3、5号线圈组作为第一条支路，将2、4、6号线圈组作为第二条支路。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}$$

然后根据电机的槽距角 α，按照A、B、C三相绕组的首端互差120°的原则，确定B相和C相绕组的首端B和C。

③ 根据B相和C相绕组已经确定的首端B和C。参考A相绕组的连接方法，完成B相和C相绕组的连接。

(7) 校核各槽内导体中的电流的正方向

校核各槽内导体中的电流正方向的原则如下。

① 对于相邻的槽，各槽内导体中的电流方向应为：同相电流方向相同，异相电流方向相反。即相邻槽内的导体，如果属于同一相绕组，则电流方向应该相同；如果不属于同一相绕组，则电流方向应该相反。

② 对于同一个槽，槽内上、下层导体中的电流方向应为：同相电流方向相同，异相电流方向相反。即同一个槽内的上、下层导体，如果属于同一相绕组，则电流方向应该相同；如果不属于同一相绕组，则电流方向应该相反。

3.2

三相单层绕组端部布线图的绘制

3.2.1 三相单层链式绕组端部布线图的绘制

【例 3-1】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$、极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带的三相单层链式绕组展开图。

解 （1）画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数 $Z_1=24$ 画出 24 个槽（单层绕组绘制 Z_1 个“○”，围成一个大圆圈），并逆时针方向编写槽号。

（2）分极距

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$ 计算出电机的极距 τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{24}{4}=6$$

然后根据电机的极距 $\tau=6$，将定子槽数分为 4 个极距，并依次标注 N1、S1、N2、S2，如图 3-1 所示。

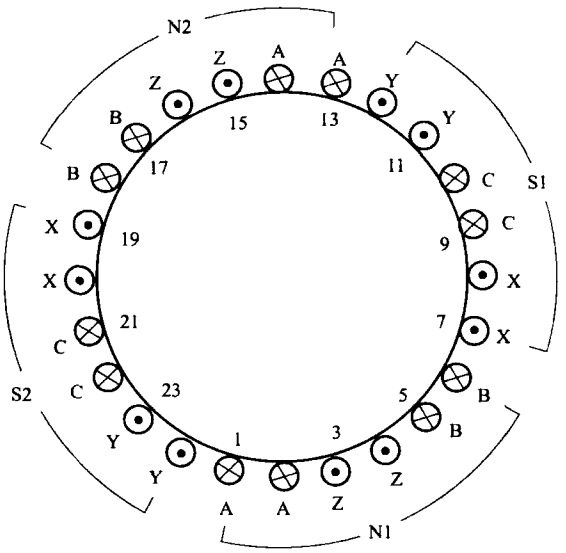


图 3-1 24 槽 4 极电机定子槽的分布

（3）分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的

每极每相槽数 q

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{24}{4\times3}=2$$

然后根据电机的每极每相槽数 $q=2$，将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 $m=3$ 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……（见图 3-1）。

（4）标注电流的正方向

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向。对于单层绕组，标注电流正方向的原则是：相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反（见图 3-1）。

（5）绘制线圈和线圈组

按照单层链式绕组的特点，根据槽内导体的电流方向，将某一个极距内的导体与相邻的（一侧或两侧）异性磁极内属于同一相的导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以 A 相为例：将 S 极下 X 相带内的两个槽（7 号槽和 8 号槽）的导体分别与两侧相邻的 N 极下的 A 相带内的导体组成两个线圈（7 号槽内的导体与 2 号槽内的导体组成一个线圈，8 号槽内的导体与 13 号槽内的导体组成一个线圈）；以此类推，将另外一个 S 极下的 X 相带内的导体分别与各自两侧相邻的 N 极下 A 相带内的导体组成两个线圈（19 与 14 号槽，20 与 1 号槽），如图 3-2 所示。本例中，由于每极每相

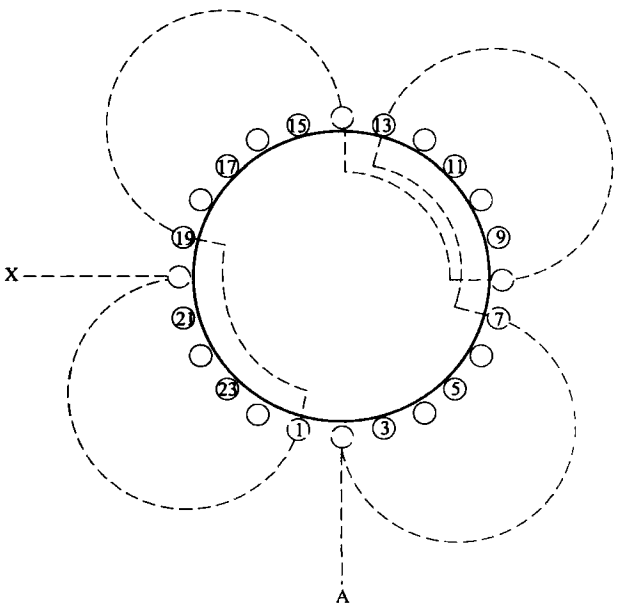


图 3-2　三相单层链式绕组中 A 相绕组端部布线图

（$Z_1=24$，$2p=4$，$a=1$）

槽数 $q=2$，所以当绘制单层链式绕组时，每个线圈组由 $\frac{q}{2}=1$ 个线圈组成，即一个线圈为一个线圈组。由图 3-2 可知，A 相共有四个线圈组。

（6）绘制相绕组

绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接成一相绕组。由于本例中，每相有四个线圈组，每个线圈组的线圈个数和线圈的节距均相同，为了保证各条支路对称，分别可以组成 $a=1$、$a=2$、$a=4$ 三种。

① 首先确定 A 相绕组的首端 A（一般取 A 相带下的线圈组的首端作为 A 相绕组的首端 A，本例题从 2 号槽引出的线圈出线端作为 A 相绕组的首端 A），然后按照所需的并联支路数 $a=1$，根据各个线圈组中电流方向，将属于 A 相的各个线圈组连接成一条支路，如图 3-2 所示。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times 360^\circ}{24}=30^\circ$$

然后根据电机的槽距角 α，按照 A、B、C 三相绕组的首端互差 120°的原则，确定 B 相和 C 相绕组的首端 B 和 C。因为 $\frac{120^\circ}{30^\circ}=4$，所以 B 相绕组的首端应与 A 相绕组的首端相隔 4 个槽，故 B 相绕组的首端应从 6 号槽引出。同理，C 相绕组的首端应与 B 相

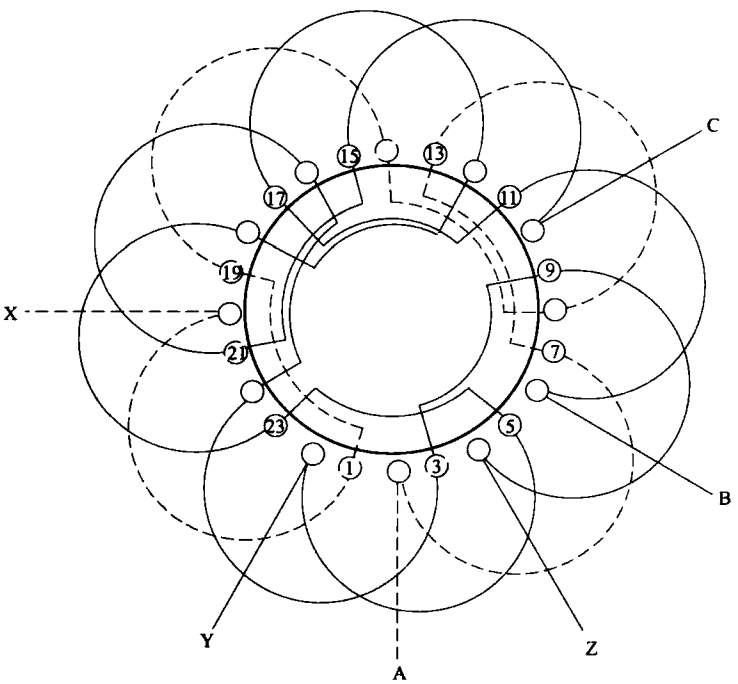


图 3-3　三相单层链式绕组端部布线图

（$Z_1=24$，$2p=4$，$a=1$）

绕组的首端相隔 4 个槽，故 C 相绕组的首端应从 10 号槽引出。

③ 根据 B 相和 C 相绕组已经确定的首端 B 和 C。参考 A 相绕组的连接方法，完成 B 相和 C 相绕组的连接，如图 3-3 所示。

3.2.2 三相单层同心式绕组端部布线图的绘制

【例 3-2】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$、极数 $2p=2$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带的三相单层同心式绕组展开图。

解 （1）画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数 $Z_1=24$ 画出 24 个槽（单层绕组绘制 Z_1 个“○”，围成一个大圆圈），并逆时针方向编写槽号。

（2）分极距

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$ 计算出电机的极距 τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{24}{2}=12$$

然后根据电机的极距 $\tau=12$，将定子槽数分为两个极距，并依次标注 N、S 如图 3-4 所示。

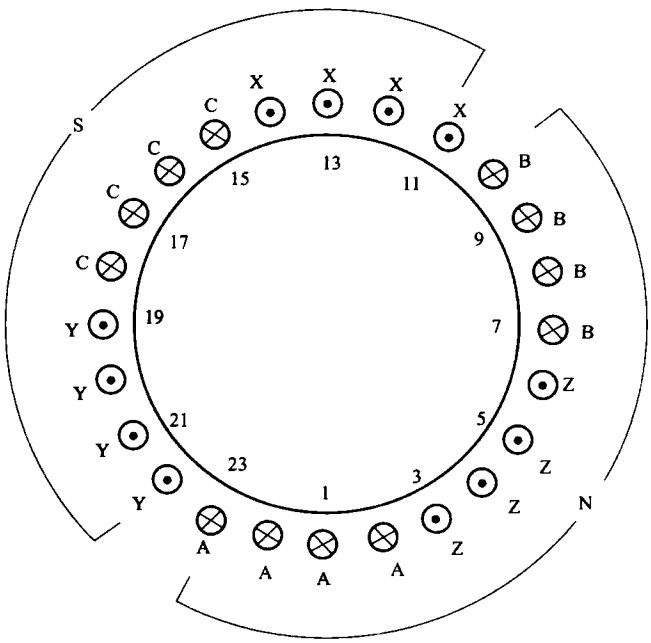


图 3-4 24 槽 2 极电机定子槽的分布

（3）分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的每极每相槽数 q

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{24}{2\times3}=4$$

然后根据电机的每极每相槽数 $q=4$，将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 $m=3$ 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y（见图 3-4）。

（4）标注电流的正方向

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向。对于单层绕组，标注电流正方向的原则是：相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反（见图 3-4）。

（5）绘制线圈和线圈组

按照单层同心式绕组的特点，根据槽内导体的电流方向，将某一个极距内的导体与相邻的（一侧或两侧）极距内属于同一相的导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以 A 相为例：将 N 极下 A 相带内的四个槽（23、24 号槽和 1、2 号槽）的导体分别与两侧相邻的 S 极下的 X 相带内的导体组四个线圈（1 号槽内的导体与 12 号槽内的导体组成一个大线圈，2 号槽内的导体与 11 号槽内的导体组成一个小线圈；以此类推，24 号槽内的导体与 13 号槽内的导体组成一个大线圈，23 号槽内的导体与 14 号槽内的导体组成一个小线圈），如图 3-5 所示。

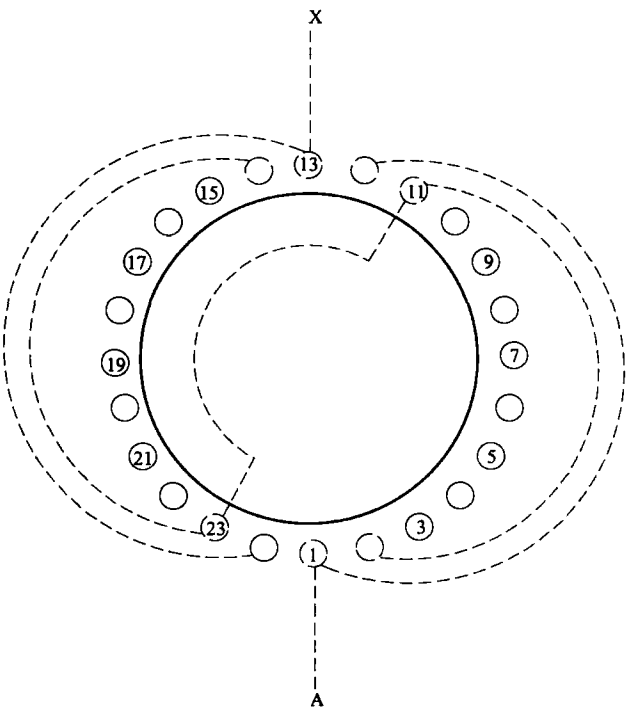


图 3-5　三相单层同心式绕组中 A 相绕组端部分布图

（$Z_1=24$，$2p=2$，$a=1$）

对于单层同心式绕组，当将某一个极距内的导体与两侧相邻的极距内属于同一相的导体分别连接成线圈，每个线圈组的线圈个数一般为$\frac{q}{2}$；当将某一个极距内的导体与一侧相邻的极距内属于同一相的导体连接成线圈，每个线圈组的线圈个数一般为q。本例中，由于是将N极下A相带内的四个槽（23、24号槽和1、2号槽）的导体分别与两侧相邻的S极距下的X相带内的导体组成四个线圈，又因为每极每相槽数$q=4$，所以当绘制单层同心式绕组时，每个线圈组由$\frac{q}{2}=\frac{4}{2}=2$个线圈（一个大线圈和一个小线圈）构成。由图3-5可知，A相共有两个线圈组。

（6）绘制相绕组

绘制相绕组就是根据并联支路数a将属于同一相的线圈组连接成一相绕组。由于本例中，每相有两个线圈组，每个线圈组的线圈个数和线圈的节距均分别相同，为了保证各条支路对称，分别可以组成$a=1$和$a=2$两种。

① 首先确定A相绕组的首端A（一般取A相带下的线圈组的首端作为A相绕组的首端A，本例题从1号槽引出的线圈出线端作为A相绕组的首端A），然后按照所需的并联支路数$a=1$，根据各个线圈组中电流方向，将属于A相的两个线圈组连接成一条支路，如图3-5所示。

② 根据电机的定子铁芯的槽数Z_1、电机的极数$2p$，计算出电机的槽距角α

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{1\times 360^\circ}{24}=15^\circ$$

然后根据电机的槽距角α，按照A、B、C三相绕组的首端互差120°的原则，确定B相和C相绕组的首端B和C。因为$\frac{120^\circ}{15^\circ}=8$，所以B相绕组的首端应与A相绕组的首端相隔8个槽，故B相绕组的首端应从9号槽引出。同理，C相绕组的首端应与B相绕组的首端相隔8个槽，故C相绕组的首端应从17号槽引出。

③ 根据B相和C相绕组已经确定的首端B和C。参考A相绕组的连接方法，完成B相和C相绕组的连接，如图3-6所示。

3.2.3 三相单层交叉式绕组端部布线图的绘制

【例3-3】 已知一台三相异步电机的定子槽数$Z_1=36$、极数$2p=4$，试绘制一个并联支路数$a=1$、60°相带的三相单层交叉式绕组端部布线图。

解 （1）画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数$Z_1=36$画出36个槽（单层绕组绘制Z_1个“○”，围成一个大圆圈），并逆时针编写槽号。

（2）分极距

根据电机的定子铁芯的槽数Z_1和电机的极数$2p$计算出电机的极距τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{36}{4}=9$$

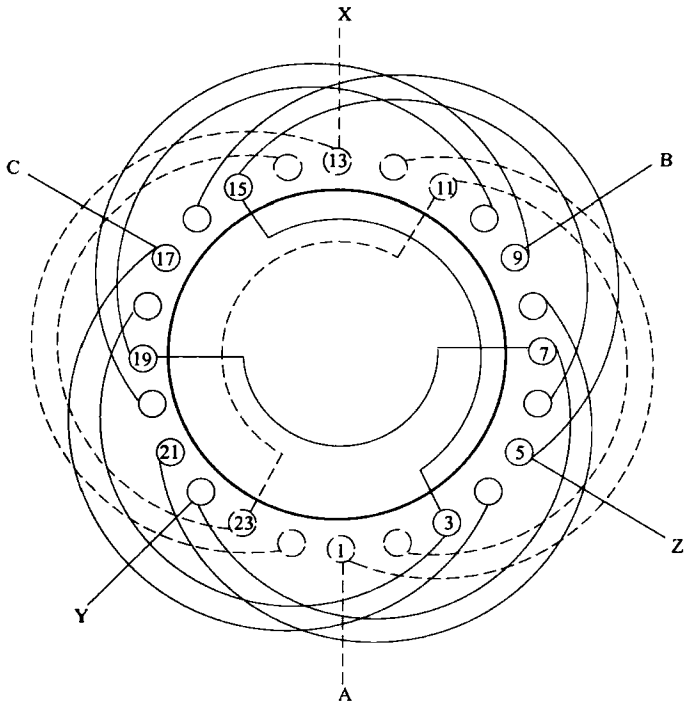


图 3-6　三相单层同心式绕组端部分布图

（$Z_1=24$，$2p=2$，$a=1$）

然后根据电机的极距 $\tau=9$，将定子槽数分为 4 个极距，并依次标注 N1、S1、N2、S2，如图 3-7 所示。

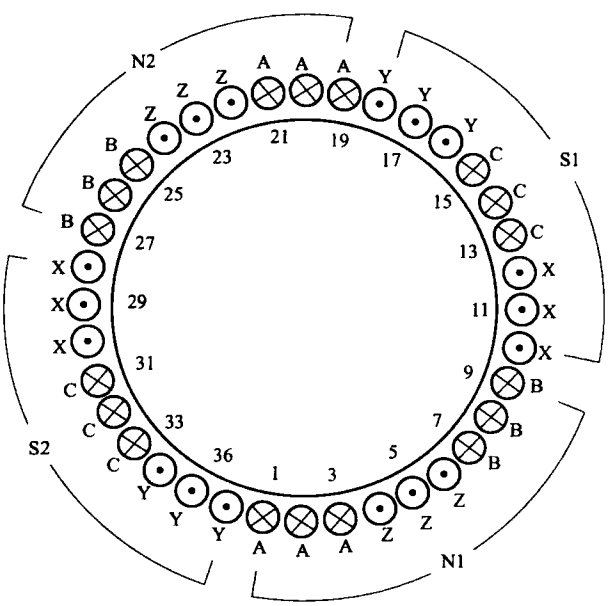


图 3-7　36 槽 4 极电机定子槽的分布

（3）分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的每极每相槽数 q

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{4\times3}=3$$

然后根据电机的每极每相槽数 $q=3$，将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 $m=3$ 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……（见图 3-7）。

（4）标注电流的正方向

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向。对于单层绕组，标注电流正方向的原则是：相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反（见图 3-7）。

（5）绘制线圈和线圈组

单层交叉式绕组一般适用于每极每相槽数 $q=3$ 的三相绕组中。按照单层交叉式绕组的特点，根据槽内导体的电流方向，将某一个极距内的导体与两侧相邻的极距内属于同一相的导体连接成线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。由于每极每相槽数 $q=3$，所以一侧为两个槽（构成两个大线圈），另一侧为一个槽（构成一个小线圈）。

以 A 相为例：将 S 极下 X 相带内的三个槽（10 号槽、11 号槽和 12 号槽）的导体分别与两侧相邻的 N 极下的 A 相带内的导体组成两个线圈组（10 号槽内的导体与 2 号槽内的导体组成一个大线圈，11 号槽内的导体与 3 号槽内的导体组成一个大线圈；12 号槽内的导体与 19 号槽内的导体组成一个小线圈）；以此类推，将另外一个 S 极下的 X 相带内的导体分别与各自两侧相邻的 N 极下 A 相带内的导体组成两个线圈组（28 与 20 号槽、29 与 21 号槽构成两个大线圈；30 与 1 号槽构成一个小线圈），如图 3-8 所示。由图 3-8 可知，A 相共有四个线圈组，其中有两个大线圈组、两个小线圈组。

（6）绘制相绕组

绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接成一相绕组。由于本例中，每相有四个线圈组，其中，两个大线圈组的线圈个数和线圈的节距均相同，两个小线圈组的线圈个数和线圈的节距相同。为了保证各条支路对称，所以最多可以连接成两条支路，即分别可以组成 $a=1$ 和 $a=2$ 两种并联支路。

① 首先确定 A 相绕组的首端 A（一般取 A 相带下的线圈组的首端作为 A 相绕组的首端 A，本例题从 2 号槽引出的线圈出线端作为 A 相绕组的首端 A），然后按照所需的并联支路数 $a=1$，根据各个线圈组中电流方向，将属于 A 相的各个线圈组连接成一条支路，如图 3-8 所示。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times360^\circ}{Z_1}=\frac{2\times360^\circ}{36}=20^\circ$$

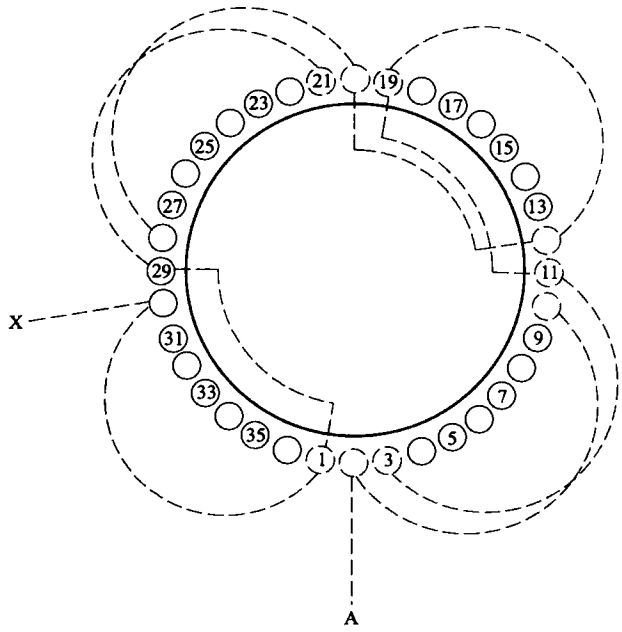


图 3-8　三相单层交叉式绕组中 A 相绕组端部布线图

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

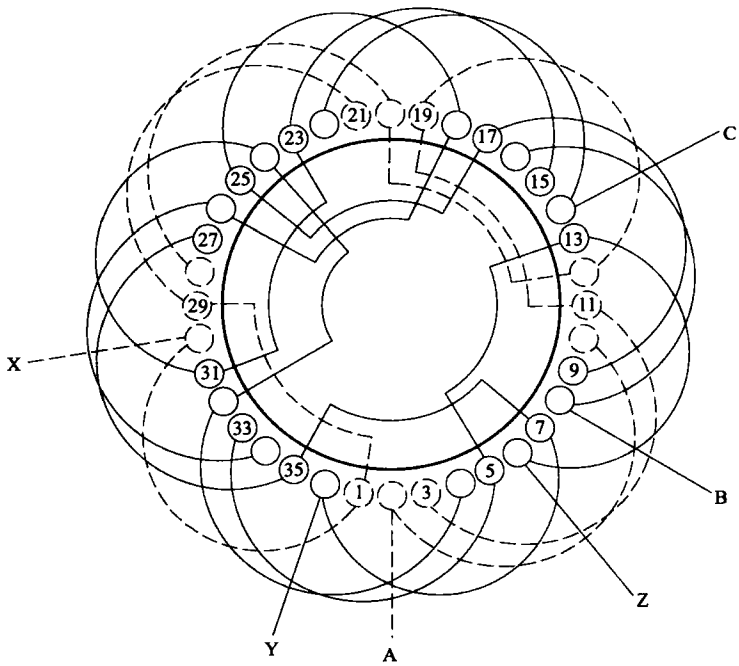


图 3-9　三相单层交叉式绕组端部布线图

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

然后根据电机的槽距角 α，按照 A、B、C 三相绕组的首端互差 120°的原则，确定 B 相和 C 相绕组的首端 B 和 C。因为 $\frac{120^\circ}{20^\circ}=6$，所以 B 相绕组的首端应与 A 相绕组的首端相隔 6 个槽，故 B 相绕组的首端应从 8 号槽引出。同理，C 相绕组的首端应与 B 相绕组的首端相隔 6 个槽，故 C 相绕组的首端应从 14 号槽引出。

③ 根据 B 相和 C 相绕组已经确定的首端 B 和 C。参考 A 相绕组的连接方法，完成 B 相和 C 相绕组的连接，如图 3-9 所示。

3.3 三相双层叠绕组端部布线图的绘制

【例 3-4】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=12$、极数 $2p=2$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带、节距 $y=\frac{5}{6}\tau$ 的三相双层叠绕组展开图。

解 （1）画槽并编号

根据交流电机定子铁芯的槽数 $Z_1=12$ 画出 12 个槽（双层绕组需要用“○”围成一个小圆圈和一个大圆圈，每一个圆圈均由 Z_1 个“○”个围成。所围成的小圆圈中的各个“○”代表各个定子槽的上层，所围成的大圆圈中的各个“○”代表各个定子槽的下层），并逆时针编写槽号。

（2）分极距

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$ 计算出电机的极距 τ

$$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{12}{2}=6$$

然后根据电机的极距 $\tau=6$，将定子槽数分为 2 个极距，并依次标注 N、S，如图 3-10 所示。

（3）分相

根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m，计算出电机的每极每相槽数 q

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{12}{2\times3}=2$$

然后根据电机的每极每相槽数 $q=2$，将定子槽分相。对于 60°相带的绕组，需要根据每极每相槽数 q 将每个极距内的定子槽分为 $m=3$ 相。并分别标注 A、Z、B、X、C、Y（见图 3-10）。

（4）标注电流的正方向

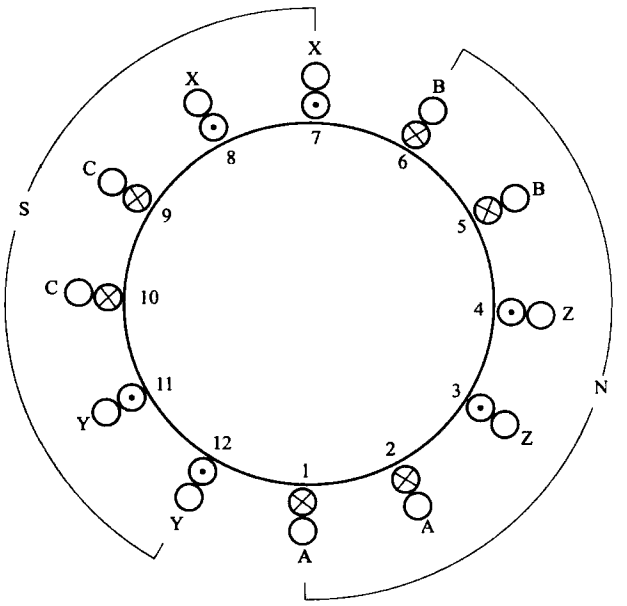


图 3-10　12 槽 2 极电机定子槽的分布

根据分相结果，标注各槽内导体中电流的正方向。对于双层绕组，只标注每个槽内上层导体中电流的正方向。标注电流正方向的原则是：相邻的槽内的导体，同相电流方向相同，异相电流方向相反（见图 3-10）。

（5）绘制线圈和线圈组

按照双层叠绕组的特点，根据槽内上层导体的电流方向，将某一个极距内的上层导体与相邻的极距内相距一个节距 $y=\frac{5}{6}\tau=\frac{5}{6}\times 6=5$ 的下层导体（无论该下层导体在属于哪一相的槽内）连接成一个线圈，然后再根据各个线圈中的电流方向，将同一个极距内属于同一相的线圈串联成线圈组。

以 A 相为例：将 N 极下 A 相带内的两个槽（1 号槽和 2 号槽）的上层导体分别与右侧相邻的 S 极下相距一个节距 $y=5$ 的下层导体组成两个线圈（1 号槽内的上层导体与 6 号槽内的下层导体组成一个线圈，2 号槽内的上层导体与 7 号槽内的下层导体组成一个线圈）；然后，再将相邻的 S 极下 X 相带内的两个槽（7 号槽和 8 号槽）的上层导体分别与右侧相邻的 N 极下相距一个节距 $y=5$ 的下层导体组成两个线圈（7 号槽内的上层导体与 12 号槽内的下层导体组成一个线圈，8 号槽内的上层导体与 1 号槽内的下层导体组成一个线圈），如图 3-11 所示。本例中，由于每极每相槽数 $q=2$，所以当绘制双层叠绕组时，每个线圈组由 $q=2$ 个线圈构成，即两个线圈为一个线圈组。由图 3-11 可知，A 相共有两个线圈组（双层叠绕组中每相线圈组的个数等于电机的极数 $2p$）。

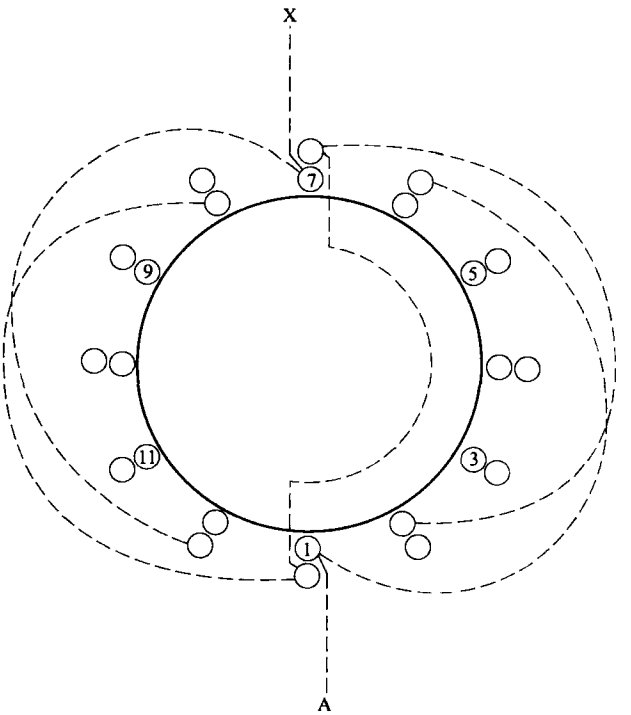


图 3-11　三相双层叠绕组中 A 相绕组端部布线图

（$Z_1=12$，$2p=2$，$a=1$）

（6）绘制相绕组

绘制相绕组就是根据并联支路数 a 将属于同一相的线圈组连接成一相绕组。由于本例中，每相有两个线圈组，每个线圈组的线圈个数和线圈的节距均相同，为了保证各条支路对称，分别可以组成 $a=1$、$a=2$ 两种。

① 首先确定 A 相绕组的首端 A（一般取 A 相带下的线圈组的首端作为 A 相绕组的首端 A，本例题从 1 号槽引出的线圈出线端作为 A 相绕组的首端 A），然后按照所需的并联支路数 $a=1$，根据各个线圈组中电流方向，将属于 A 相的各个线圈组连接成一条支路，如图 3-11 所示。

② 根据电机的定子铁芯的槽数 Z_1、电机的极数 $2p$，计算出电机的槽距角 α

$$\alpha=\frac{p\times 360^\circ}{Z_1}=\frac{1\times 360^\circ}{12}=30^\circ$$

然后根据电机的槽距角 α，按照 A、B、C 三相绕组的首端互差 120°的原则，确定 B 相和 C 相绕组的首端 B 和 C。因为 $\frac{120^\circ}{30^\circ}=4$，所以 B 相绕组的首端应与 A 相绕组的首端相隔 4 个槽，故 B 相绕组的首端应从 5 号槽引出。同理，C 相绕组的首端应与 B 相

绕组的首端相隔 4 个槽，故 C 相绕组的首端应从 9 号槽引出。

③ 根据 B 相和 C 相绕组已经确定的首端 B 和 C。参考 A 相绕组的连接方法，完成 B 相和 C 相绕组的连接，如图 3-12 所示。

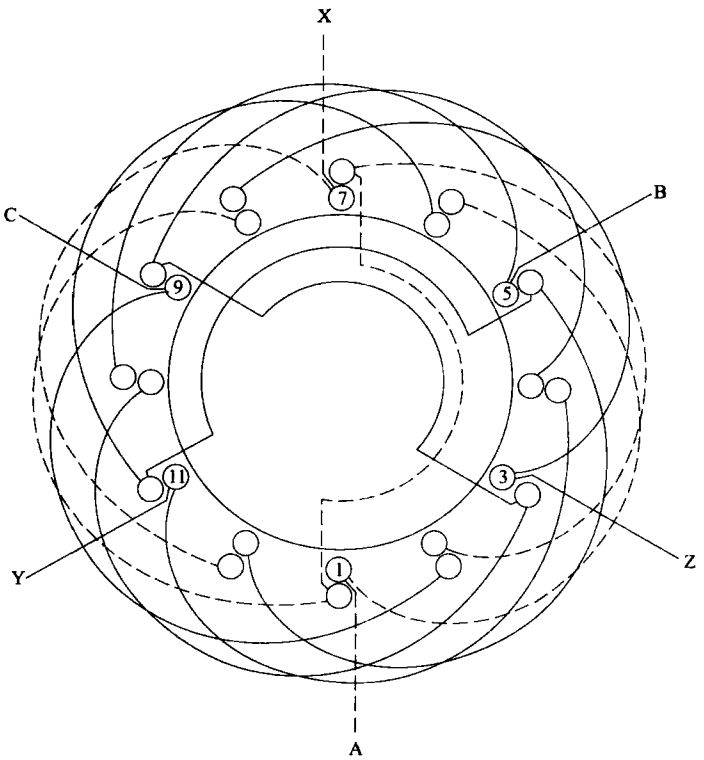


图 3-12　三相双层叠绕组端部布线图

（$Z_1=12$，$2p-2$，$a-1$）

3.4 三相异步电机常用定子绕组端部布线图实例

【例 3-5】 三相 6 极 36 槽单层链式绕组端部布线图（见图 3-13）

【例 3-6】 三相 2 极 36 槽单层同心式绕组端部布线图（见图 3-14）

【例 3-7】 三相 6 极 54 槽单层交叉式绕组端部布线图（见图 3-15）

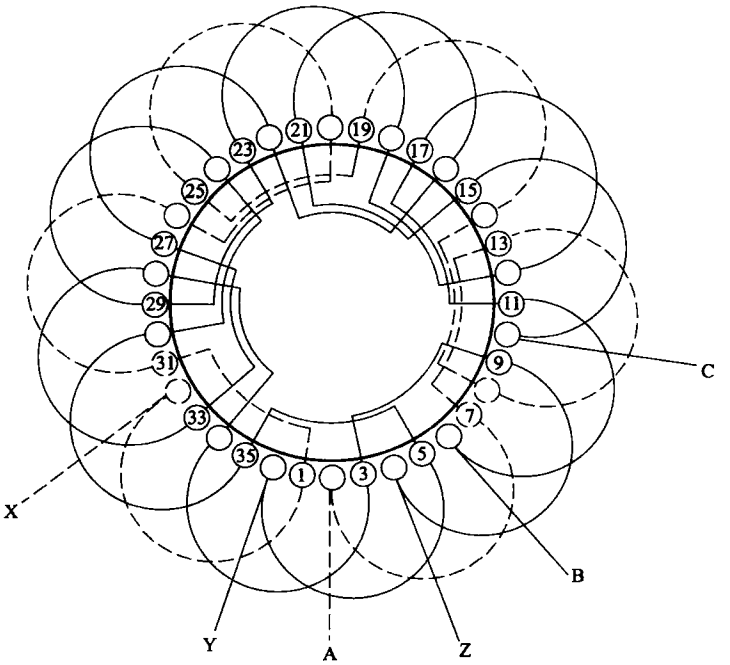


图 3-13　三相单层链式绕组端部布线图

（$Z_1=36$，$2p=6$，$a=1$）

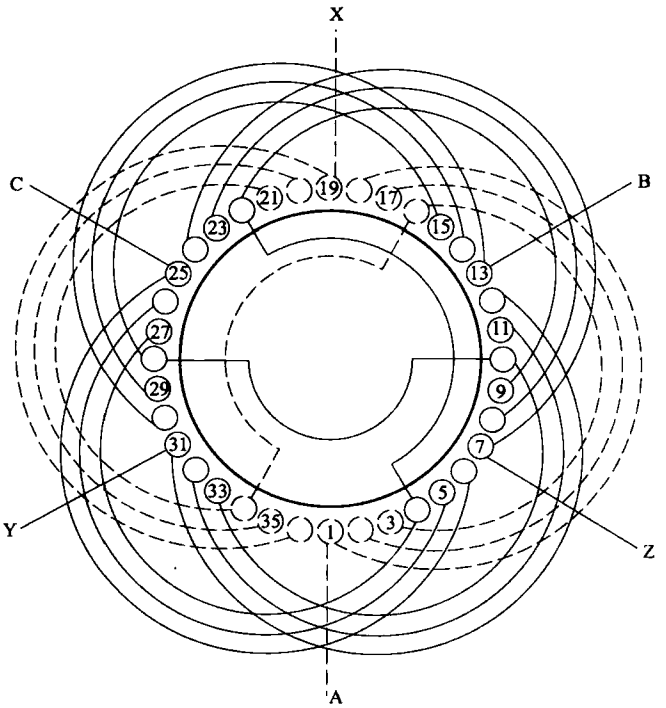


图 3-14　三相单层同心式绕组端部布线图

（$Z_1=36$，$2p=2$，$a=1$）

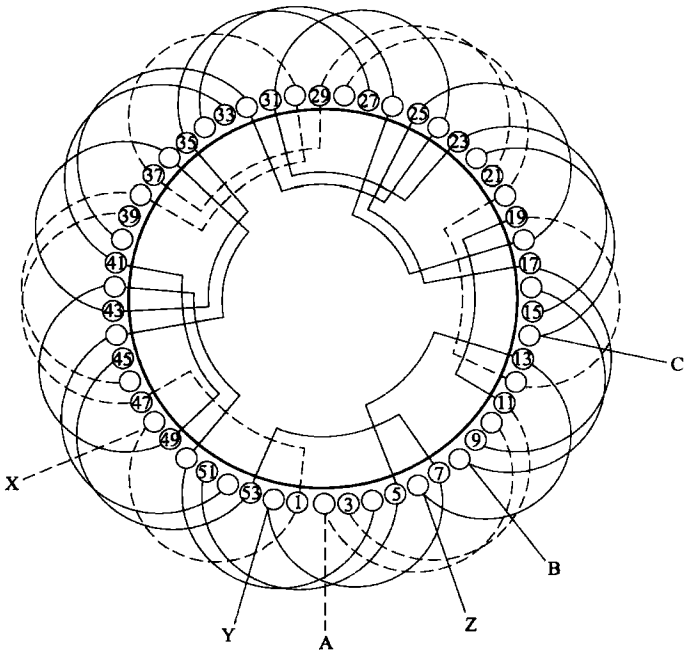


图 3-15　三相单层交叉式绕组端部布线图

（$Z_1=54$，$2p=6$，$a=1$）

第4章

三相异步电机定子绕组接线圆图

4.1 定子绕组接线圆图的特点和绘制方法 / 91
4.2 常用定子绕组接线圆图的绘制实例 / 94
4.3 三相异步电机定子绕组接线圆图识读实例 / 103

4.1 定子绕组接线圆图的特点和绘制方法

4.1.1 定子绕组接线圆图的特点

三相异步电机定子绕组接线圆图（又称定子绕组接线简图或定子绕组接线图）重点描述的是三相绕组中各个极相组（线圈组）之间的连接方法，以及各相绕组首末端引出线的位置等。定子绕组接线圆图的主要特点如下。

① 定子绕组接线圆图的绘制方法简单，易于识读。

② 定子绕组接线圆图的形状为一个圆环，该圆环由许多圆弧构成。

③ 定子绕组接线圆图中的每一段圆弧代表一个极相组（线圈组）。

④ 利用定子绕组接线圆图，可以了解该电机极数 $2p$、定子绕组有多少个极相组（线圈组）以及各个极相组（线圈组）之间的连接规律。

⑤ 利用定子绕组接线圆图，还可以了解该电机定子绕组的并联支路数 a 以及各相绕组首末端引出线的位置。

⑥ 利用定子绕组接线圆图，可以了解各个极相组（线圈组）所包含的线圈号（或线圈上层边所在的槽号），但是不能了解线圈的节距 y。

4.1.2 定子绕组接线圆图的绘制方法

由于三相异步电机定子绕组接线圆图重点描述的是三相绕组中各个极相组（线圈组）之间的连接方法，以及各相绕组首末端引出线的位置等，所以绘制定子绕组接线圆图的方法步骤如下。

（1）根据电机的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m（三相交流电机取 $m=3$；单相交流电机取 $m=2$），计算电机的每极每相槽数 q

对于 60°相带的绕组：

$$q=\frac{Z_1}{2pm}$$

对于 120°相带的绕组：

$$q=\frac{Z_1}{pm}$$

（2）根据电机的极数 $2p$、定子槽数 Z_1 和每极每相槽数 q，确定电机每相绕组中极相组（线圈组）的个数

① 对于 60°相带的三相双层叠绕组和三相双层波绕组，每相绕组中极相组（线圈

组）的个数 n 为

$$n=\frac{Z_1}{mq}=2p$$

即每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为 $2p$。

② 对于 120°相带的三相双层叠绕组和三相双层波绕组，每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为

$$n=\frac{Z_1}{mq}=p$$

即每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为 p。也就是说，采用 120°相带的三相双层绕组时每相绕组中极相组（线圈组）的个数为采用 60°相带的三相双层绕组时每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 的一半。

③ 对于 60°相带的三相单层绕组（以 A 相为例），如果将某一个磁极下属于 A 相的槽内的线圈边分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于 A 相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈组（如单层链式绕组、单层交叉式绕组及某些单层同心式绕组）。则每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为

$$n=\frac{\frac{Z_1}{2}}{m\frac{q}{2}}=2p$$

即每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为 $2p$。

如果将某一个磁极下属于 A 相的槽内的线圈边全部与一侧相邻的异性磁极下属于 A 相的槽内的线圈边连接起来，构成一个线圈组（如单层等元件绕组及某些单层同心式绕组）。则每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为

$$n=\frac{\frac{Z_1}{2}}{mq}=p$$

即每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为 p。

④ 对于 120°相带的三相单层绕组，其每相绕组中线圈组的个数为对应绕组形式的 60°相带的三相单层绕组中每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 的一半。

（3）根据三相绕组总的线圈组个数 $3n$，画出 $3n$ 段“[redacted]”圆弧，构成一个圆环

将未涂色的一端称为该线圈组的首端（又称该线圈组的头），将已涂色的一端称为该线圈组的末端（又称该线圈组的尾）。（注：也可以将已涂色的一端称为该线圈组的首端，将未涂色的一端称为该线圈组的末端。但是，在整个绕组接线圆图中，表示的方法应一致）。

也可以根据三相绕组总的线圈组个数 $3n$，画出 $3n$ 段圆弧，构成一个圆环。以逆时针方向观察各段圆弧，将先观察到的一端称为该线圈组的首端（又称该线圈组的

头），将后观察到的一端称为该线圈组的末端（又称该线圈组的尾）。（注：也可以以顺时针方向观察各段圆弧，将先观察到的一端称为该线圈组的首端，将后观察到的一端称为该线圈组的末端。但是，在整个绕组接线圆图中，表示的方法应一致）。

（4）沿逆时针（或顺时针）方向，在各段圆弧上标注其所属相别

对于60°相带的绕组其排列顺序为：A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y……

对于120°相带的绕组其排列顺序为：A、B、C、A、B、C……

（5）标注各个线圈组中电流的正方向

其标注原则是，相邻的极相组，同相电流方向相同，异相电流方向相反。即表示电流方向的箭头应该为一正一反、一正一反……

（6）连接属于A相绕组的各个极相组（线圈组）

首先确定A相的首端A，然后根据并联支路数 a 和极相组（线圈组）中的电流方向，完成A相绕组的连接。

（7）连接B、C相绕组的各个极相组（线圈组）

根据极相组（线圈组）中的电流正方向，确定B、C相绕组的首端，然后根据并联支路数 a 和极相组（线圈组）中的电流方向，连接属于B、C相绕组的各个极相组（线圈组）。

4.1.3 定子绕组接线圆图的连接规律

通常的接线方式有显极和庶极（或称隐极）两种。

在一个极面下属于同一相的所有线圈串联在一起称为一个极相组（即线圈组的个数 $n=2p$）。例如在图4-1所示的一台四极电机中，一相有四个极相组，而每一个极相组中有两个线圈。

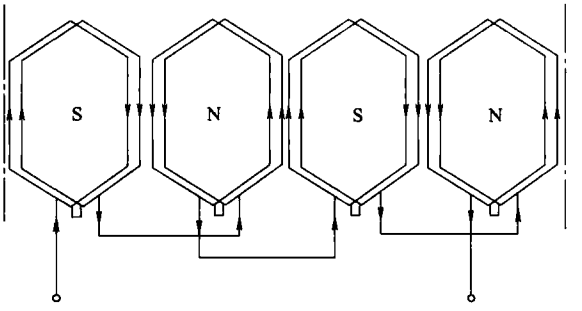


图4-1 四极电机显极接线方式

对于图4-1所示的四极电机，为保证N极和S极互相交替排列，相邻的两个极相组中电流的方向必须相反。例如，在N极下极相组中电流是逆时针方向，则在相邻的S极下极相组中电流就必须为顺时针方向。在连接各极相组时，必须顺着电流方向。一般称每个极相组（或线圈）中左侧的引线为头，右侧的引线为尾。所以从图

4-1 中可以看出，各极相组之间的连接，必须是头接头、尾接尾，这是绝大多数电机极相组接线的一般规律，称为显极接线方式。

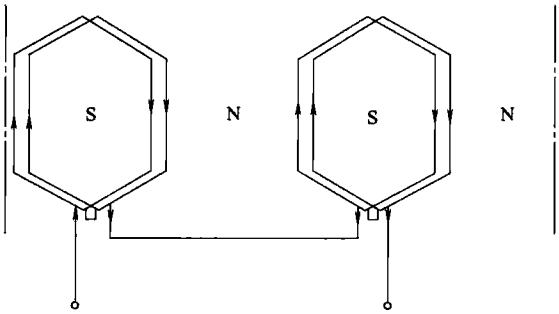


图 4-2　四极电机庶极接线方式

图 4-2 也是一台四极电机，但是只有两个极相组（即线圈组的个数 $n=p$），在这种情况下，两个极相组中的电流方向必须相同，才能产生四极磁场。如图 4-2 中所示各极相组中电流的方向都是顺时针的，在顺着电流方向连接极相组时，就必须头接尾、尾接头，这是一般规律之外的特例，称为庶极（或隐极）接线方式。这种接法一般不使用，而在单绕组变极多速电机中会经常遇到。

4.2 常用定子绕组接线圆图的绘制实例

4.2.1　三相双层叠绕组接线圆图的绘制

【例 4-1】 已知一台三相异步电机，定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$、60°相带的三相双层叠绕组的接线圆图。

解（1）根据电机的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m 计算电机的每极每相槽数 q，对于 60°相带的绕组：

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{4\times3}=3$$

（2）根据电机的极数 $2p$、定子槽数 Z_1 和每极每相槽数 q，确定电机每相绕组中极相组（线圈组）的个数：

对于 60°相带的三相双层叠绕组，每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为

$$n=\frac{Z_1}{mq}=2p=4$$

即每相绕组中极相组（线圈组）的个数 $n=2p=4$。

（3）根据三相绕组总的线圈组个数 $3n$，画出 $3n=3\times4=12$ 段圆弧，构成一个圆环。

（4）沿逆时针方向，在各段圆弧上标注其所属相别：对于 60°相带的绕组，其排列顺序为：A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y。

（5）标注各个线圈组中电流的正方向，其标注原则是：相邻的极相组，同相电流方向相同，异相电流方向相反。即表示电流方向的箭头应该为一正一反、一正一反……如图 4-3 所示。

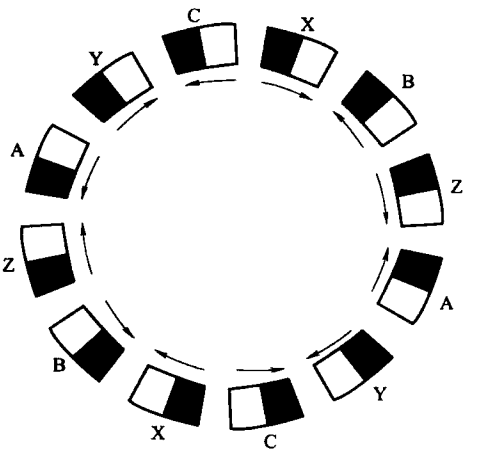


图 4-3　三相四极电机极相组的分布

（$Z_1=36$，$2p=4$）

（6）连接属于 A 相绕组的各个线圈组。首先确定 A 相的首端 A，然后根据并联支路数 a 和线圈组中的电流方向，完成 A 相绕组的连接，如图 4-4 所示。从图 4-4 中可以看出，A 相的连接规律为头接头、尾接尾。

（7）根据 A、B、C 三相绕组应互差 120°电角度的原则，在此例中，$2p=4$，总的电角度为 $p\times360°=2\times360°=720°$，极相组数为 12，故两相邻极相组间电角度为 $720°/12=60°$。则 B 相首端滞后 A 相首端两个极相组，C 相首端滞后 B 相首端两个极相组。然后按照 A 相连接方式，分别将 B 相和 C 相连接完毕（见图 4-4）。

同理，三相四极双层叠绕组接线圆图也可以采用另一种画法，如图 4-5 所示。

为了得出三相绕组首端互差 120°电角度，可以有各种引出线的位置。如图 4-6 所示的接线圆图中，B 相首端滞后 A 相首端 120°电角度，C 相首端超前 A 相首端 120°电角度，这样三相首端仍互差 120°电角度，同样可以产生三相旋转磁场。这种接线方式，6 根引出线靠得较近，引出线也较短，可以节省引出线，也便于包扎，故被较多的工厂采用。

【例 4-2】 已知一台三相异步电机，定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=2$（或 $a=4$）、60°相带的三相双层叠绕组的接线圆图。

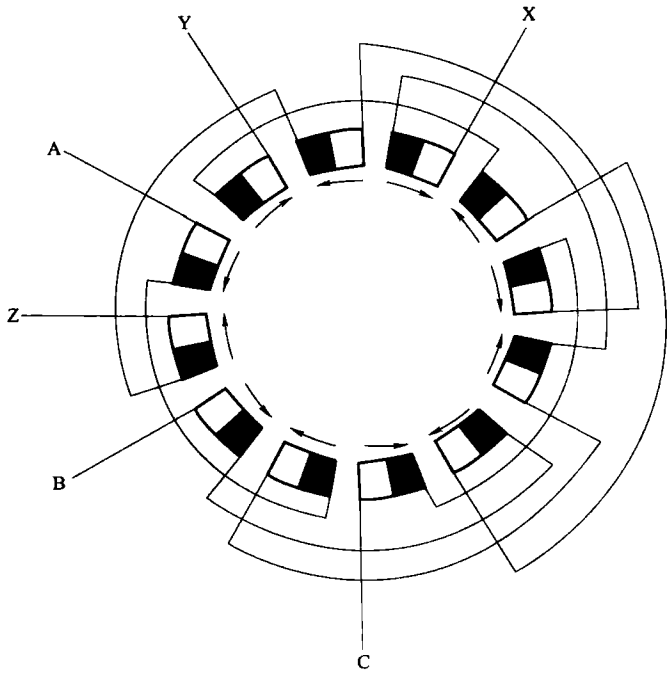


图 4-4　三相四极双层叠绕组接线圆图（1）

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

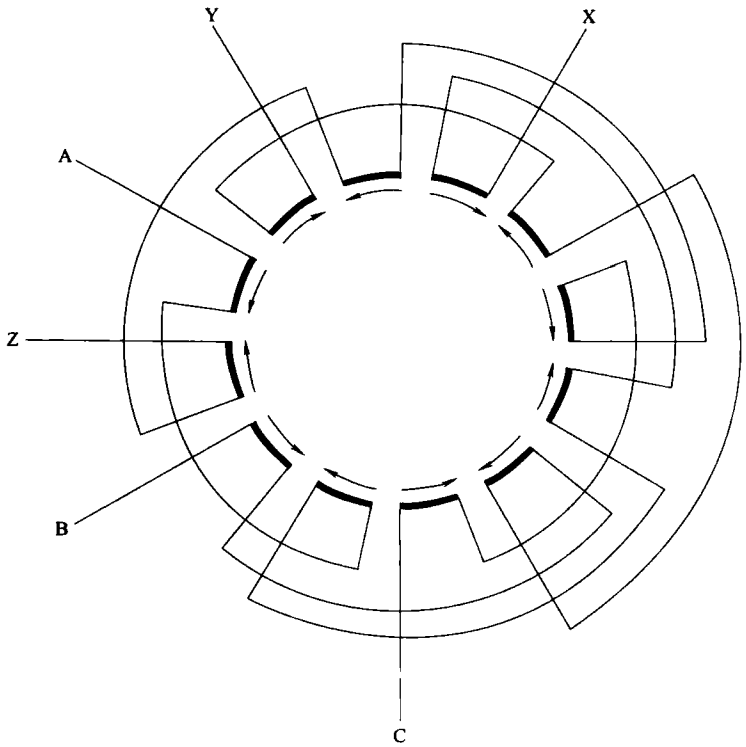


图 4-5　三相四极双层叠绕组接线圆图（2）

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

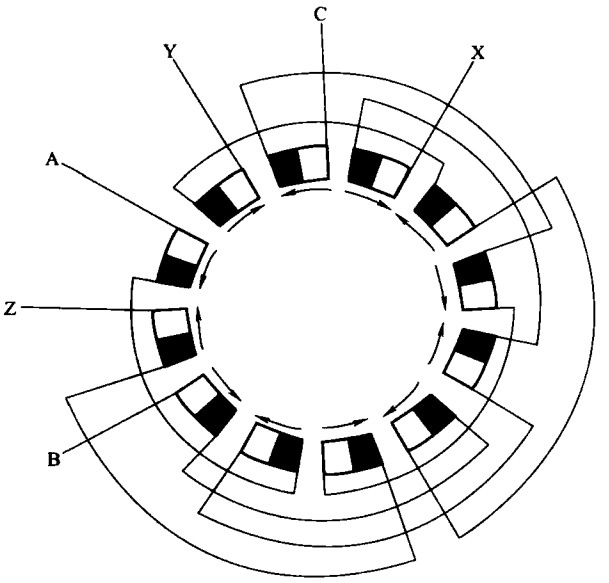


图 4-6　三相四极双层叠绕组接线圆图（3）

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

解　由于本例题与例 4-1 的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$、电机的相数 m 以及相带等均相同，仅并联支路数 a 不同。所以，该电机的每极每相槽数 q、电机每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 等均相同，其极相组的分布如图 4-3 所示。由于并联支路数 a 不同，所以，各个极相组（线圈组）之间的连接有所不同。

几个支路并联连接的原则是：

（1）各支路均顺着接线图中的电流正方向（箭头方向）连接。

（2）并联后各支路极相组数相等。

对于本例题，按照上面所说的原则接成两个支路并联。首先将每相绕组的极相组分别串联为两个支路，再将两个支路并联，其方法有两种，一种是短连接，另一种是长连接。

短连接是每一个支路的所有极相组集中在定子圆周的一半，即把相邻的极相组串联为一条支路，如图 4-7 所示（图中数字为线圈号，即线圈上层边所在的槽号）。长连接是每一支路的所有极相组分布在整个定子圆周上，即隔极相组串联为一条支路。上述两种接法效果是相同的，均符合以上原则。

同理，当并联支路数 $a=4$ 时，按照几条支路并联连接的原则，可得三相四极双层叠绕组接线圆图，如图 4-8 所示。

4.2.2　三相单层交叉式绕组接线圆图的绘制

【例 4-3】　已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个

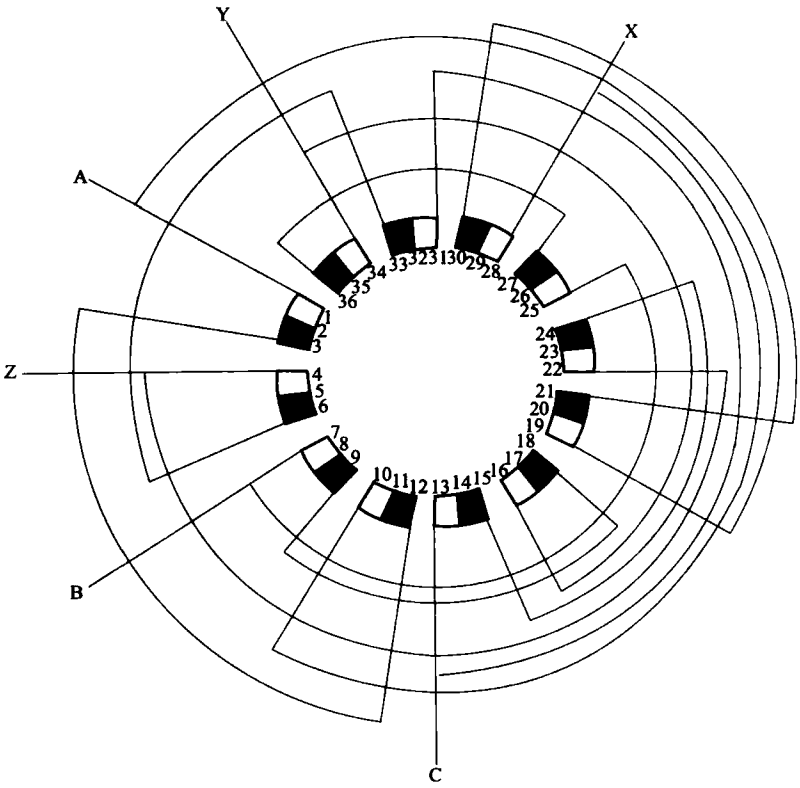


图 4-7　三相四极双层叠绕组接线圆图（4）

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=2$）

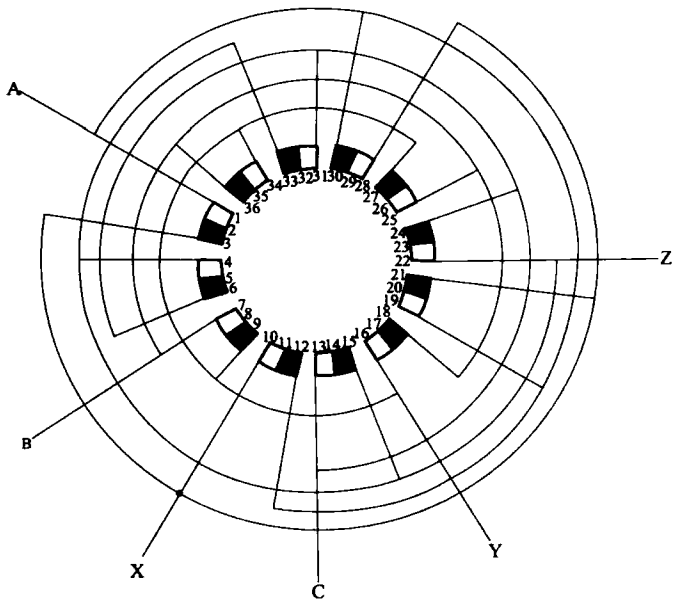


图 4-8　三相四极双层叠绕组接线圆图（5）

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=4$）

并联支路数 $a=1$、60°相带的三相单层交叉式绕组接线圆图。

解 （1）根据电机的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m 计算电机的每极每相槽数 q，对于60°相带的绕组：

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{4\times3}=3$$

（2）根据电机的极数 $2p$、定子槽数 Z_1 和每极每相槽数 q，确定电机每相绕组中极相组（线圈组）的个数：

对于60°相带的三相单层交叉式绕组（以A相为例），由于是将某一个磁极下属于A相的槽内的线圈边分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于A相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈组。所以，每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为

$$n=\frac{\frac{Z_1}{2}}{m\frac{q}{2}}=2p=4$$

即每相绕组中极相组（线圈组）的个数 $n=2p=4$。

（3）根据三相绕组总的线圈组个数 $3n$，画出 $3n=3\times4=12$ 段圆弧，构成一个圆环。

（4）沿顺时针方向，在各段圆弧上标注其所属相别：对于60°相带的绕组，其排列顺序为：A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y。

（5）标注各个线圈组中电流的正方向，其标注原则是：相邻的极相组，同相电流方向相同，异相电流方向相反。即表示电流方向的箭头应该为一正一反、一正一反……如图4-3所示。

（6）连接属于A相绕组的各个线圈组。首先确定A相的首端A，然后根据并联支路数 a 和线圈组中的电流方向，完成A相绕组的连接，如图4-9所示（注：图中数字为线圈的“上层边”所在的槽号，即在展开图中，线圈的左侧线圈边所在的槽号）。从图4-9中可以看出，A相的连接规律为头接头、尾接尾。

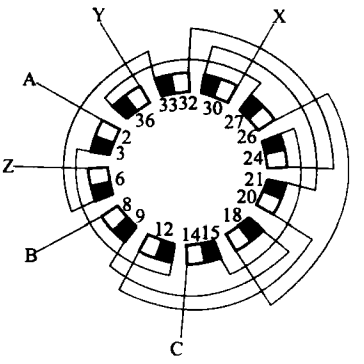


图4-9 三相四极单层交叉式绕组接线圆图

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=1$）

（7）根据A、B、C三相绕组应互差120°电角度的原则，在此例中，$2p=4$，总的电角度为 $p\times360°=2\times360°=720°$，极相组数为12，故两相邻极相组间电角度为 $720°/12=60°$。则B相首端滞后A相首端两个极相组；C相首端滞后B相首端两个极相组。然后按照A相连接方式，分别将B相和C相连接完毕（见图4-9）。

【例4-4】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$，试绘制一个

并联支路数 $a=2$，60°相带的三相单层交叉式绕组接线圆图。

解 由于本例题电机与【例 4-3】电机的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$、电机的相数 m 及相带均相同，仅并联支路数 a 不同。所以，在【例 4-3】的基础上，仅改变线圈组之间的连接即可，但应注意每条支路的线圈数目应相等，而且各线圈的节距也应分别相同。并联支路数 $a=2$ 时，三相四极单层交叉式绕组接线圆图如图 4-10 所示。

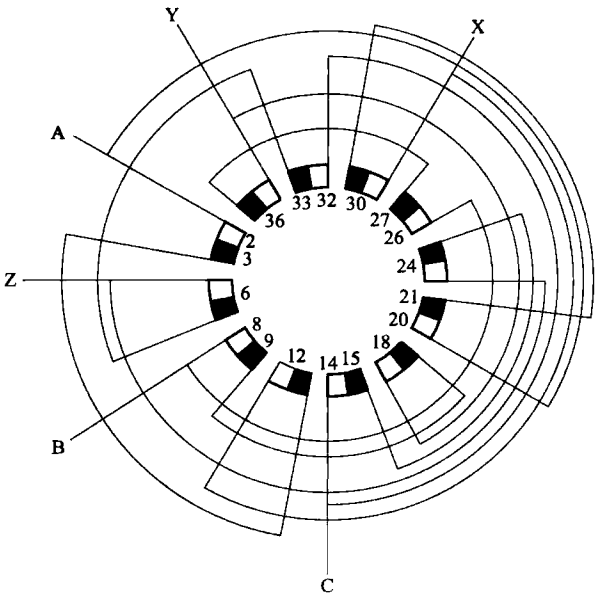


图 4-10 三相四极单层交叉式绕组接线圆图

（$Z_1=36$，$2p=4$，$a=2$）

在定子槽数 $Z_1=36$，极数 $2p=4$ 的三相单层交叉式绕组中，每相绕组包括四个线圈组，其中有两个大线圈组（每个线圈组由两个大线圈构成）和两个小线圈组（每个线圈组由一个小线圈构成），为保证各个并联支路的线圈数目相等，而且各线圈的节距也分别相同，只能得到 $a=1$ 和 $a=2$ 两种并联支路形式。

4.2.3 三相单层链式绕组接线圆图的绘制

【例 4-5】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，试绘制一个并联支路数 $a=1$，60°相带的三相单层链式绕组接线圆图。

解 （1）根据电机的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m 计算电机的每极每相槽数 q，对于 60°相带的绕组：

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{24}{4\times 3}=2$$

（2）根据电机的极数 $2p$、定子槽数 Z_1 和每极每相槽数 q，确定电机每相绕组中极相组（线圈组）的个数：

对于60°相带的三相单层链式绕组（以A相为例），由于是将某一个磁极下属于A相的槽内的线圈边分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于A相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈组。所以，每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为

$$n=\frac{\frac{Z_1}{2}}{m\frac{q}{2}}=2p=4$$

即每相绕组中极相组（线圈组）的个数 $n=2p=4$。

（3）根据三相绕组总的线圈组个数 $3n$，画出 $3n=3\times4=12$ 段圆弧，构成一个圆环。

（4）沿顺时针方向，在各段圆弧上标注其所属相别：对于60°相带的绕组，其排列顺序为：A、Z、B、X、C、Y、A、Z、B、X、C、Y。

（5）标注各个线圈组中电流的正方向，其标注原则是：相邻的极相组，同相电流方向相同，异相电流方向相反。即表示电流方向的箭头应该为一正一反、一正一反……如图4-3所示。

由此得出以下结论，无论采用哪一种绕组，只要其相数 m 和极数 $2p$ 相同，则各个极相组（线圈组）的分布相同。

（6）连接属于A相绕组的各个线圈组。首先确定A相的首端A，然后根据并联支路数 a 和线圈组中的电流方向，完成A相绕组的连接，如图4-11所示（注：图中数字为线圈的“上层边”所在的槽号，即在展开图中，线圈的左侧线圈边所在的槽号）。从图4-11中可以看出，A相的连接规律为头接头、尾接尾。

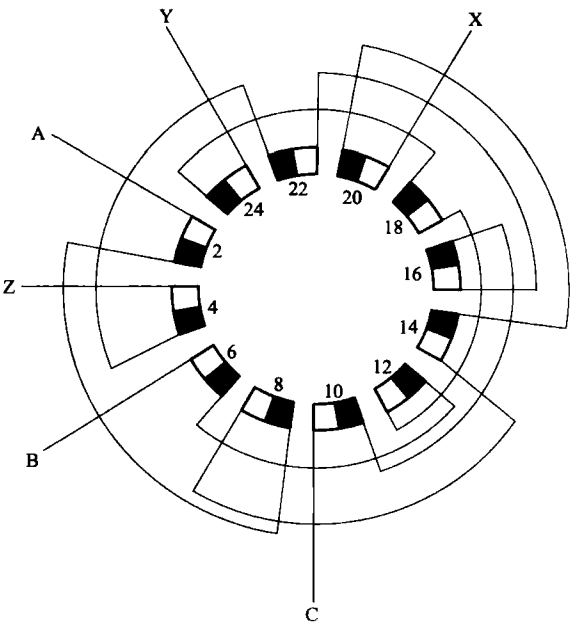


图4-11 三相四极单层链式绕组接线圆图

（$Z_1=24$，$2p=4$，$a=1$）

（7）根据A、B、C三相绕组应互差120°电角度的原则，在此例中，$2p=4$，总的电角度为 $p\times360°=2\times360°=720°$，极相组数为12，故两相邻极相组间电角度为 $720°/12=60°$。则B相首端滞后A相首端两个极相组；C相首端滞后B相首端两个极相组。然后按照A相连接方式，分别将B相和C相连接完毕（见图4-11）。

4.2.4 三相单层同心式绕组接线圆图的绘制

【例4-6】 已知一台三相异步电机的定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=2$，试绘制一个并联支路数 $a=1$，60°相带的三相单层同心式绕组接线圆图。

解 （1）根据电机的定子槽数 Z_1、电机的极数 $2p$ 和电机的相数 m 计算电机的每极每相槽数 q，对于60°相带的绕组：

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{24}{2\times3}=4$$

（2）根据电机的极数 $2p$、定子槽数 Z_1 和每极每相槽数 q，确定电机每相绕组中极相组（线圈组）的个数：

对于60°相带的三相单层同心式绕组（以A相为例），如果是将某一个磁极下属于A相的槽内的线圈边分为两部分，分别与相邻的异性磁极下属于A相的槽内的线圈边连接起来，构成两个线圈组。所以，每相绕组中极相组（线圈组）的个数 n 为

$$n=\frac{\frac{Z_1}{2}}{m\frac{q}{2}}=2p=2$$

即每相绕组中极相组（线圈组）的个数 $n=2p=2$。

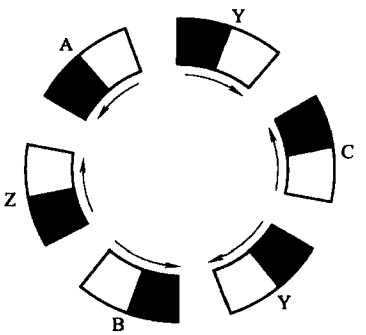


图4-12 三相二级电机极相组的分布图

（$Z_1=24$，$2p=2$，$a=1$）

（3）根据三相绕组总的线圈组个数 $3n$，画出 $3n=3\times2=6$ 段圆弧，构成一个圆环。

（4）沿顺时针方向，在各段圆弧上标注其所属相别：对于60°相带的绕组，其排列顺序为：A、Z、B、X、C、Y。

（5）标注各个线圈组中电流的正方向，其标注原则是：相邻的极相组，同相电流方向相同，异相电流方向相反。即表示电流方向的箭头应该为一正一反、一正一反……如图4-12所示。

（6）连接属于A相绕组的各个线圈组。首先确定A相的首端A，然后根据并联支路数 a 和线圈组中的电流方向，完成A相绕组的连接，如图4-13所示（注：图中数字为线圈的“上层边”所在的槽号，即在展开图中，线圈的左侧线圈边所在的槽号）。从图4-13中可以看出，A相的连接规律为头接头、尾接尾。

（7）根据A、B、C三相绕组应互差120°电角度的原则，在此例中，$2p=2$，总的电角度为 $p\times360°=1\times360°=360°$，极相组数为6，故两相邻极相组间电角度为 $360°/6=60°$。则B相首端滞后A相首端两个极相组；C相首端滞后B相首端两个极

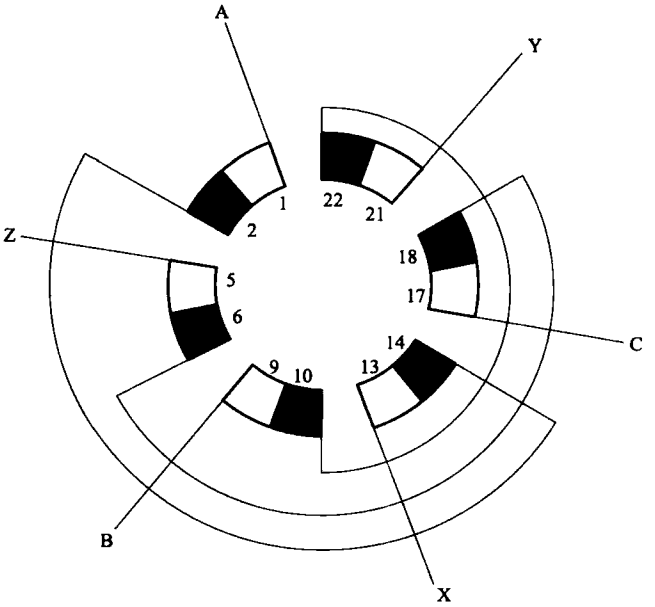


图 4-13　三相二极单层同心式绕组接线圆图

（$Z_1=24$，$2p=2$，$a=1$）

相组。然后按照 A 相连接方式，分别将 B 相和 C 相连接完毕（见图 4-13）。

4.3 三相异步电机定子绕组接线圆图识读实例

4.3.1　定子绕组接线圆图识读的方法步骤

识读三相异步电机定子绕组接线圆图的方法步骤如下。

（1）观察极相组（线圈组）之间的连接规律，判断绕组的种类

如果各个极相组（线圈组）之间的连接规律是“头接头，尾接尾”，则该绕组为显极式绕组；如果各个极相组（线圈组）之间的连接规律是“头接尾，尾接头”，则该绕组为庶极式绕组（又称隐极式绕组）。

（2）根据每相绕组中各个极相组（线圈组）之间的连接，判断绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，通常以该相绕组的首端 A 开始观察，如果从 A 端开始，依次将 A 相绕组的全部线圈组串联成一条支路，则电机的并联支路数 $a=1$；如果从 A 端开始，将 A 相绕组的全部线圈组分成两条支路，则电机的并联支路数 $a=2$；以此

类推。

（3）观察每相极相组（线圈组）的个数 n，判断电机的极数 $2p$

对于三相交流电机，每相的极相组（线圈组）的个数 n 等于电机极相组（线圈组）的总数的三分之一。根据每相极相组（线圈组）的个数 n 和绕组的形式，可以求出电机的极数 $2p$。

当绕组为显极式绕组时

$$2p=n$$

当绕组为庶极式绕组时

$$2p=2n$$

（4）根据极相组（线圈组）旁标出的数字，判断绕组的层数

在绕组接线图中，极相组（线圈组）旁标出的数字含义如下。

对于双层绕组，极相组（线圈组）旁标出的数字是该极相组（线圈组）所包含的线圈的上层边所在的槽号，也是线圈号。

对于单层绕组，极相组（线圈组）旁标出的数字是该极相组（线圈组）所包含的线圈的“上层边”所在的槽号，即在展开图中，线圈的左侧线圈边所在的槽号。

如果在整个绕组接线图中，极相组（线圈组）旁标出的数字是连续的，则表示每个定子槽内都有线圈的上层边，所以该绕组应为双层绕组；如果在整个绕组接线图中，极相组（线圈组）旁标出的数字是断续的，则表示有的定子槽内有线圈的“上层边”，有的定子槽内没有线圈的“上层边”，所以该绕组应为单层绕组（或单双层混合绕组）。

（5）根据极相组（线圈组）旁标出的数字和绕组的层数，判断定子槽数 Z_1

对于双层绕组，极相组（线圈组）旁标出的最大数字即为定子槽数 Z_1；对于单层绕组（或单双层混合绕组），极相组（线圈组）旁标出的最大数字近似等于定子槽数 Z_1，然后，可以根据数字间隔的多少，估算定子槽数 Z_1。（注意：三相异步电机常用定子槽数为 18、24、30、36、48、54、60、72 等，还应注意：定子槽数 Z_1 应大于或等于图中所标出的最大数字）。

（6）根据定子槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$，计算每极每相槽数 q

对于 60°相带的绕组

$$q=\frac{Z_1}{2pm}$$

对于 120°相带的绕组

$$q=\frac{Z_1}{pm}$$

一般情况下，普通三相异步电机常采用 60°相带的绕组。变极多速三相异步电机一般少极数常采用 60°相带的绕组，多极数常采用 120°相带的绕组。

如果每极每相槽数 q 为整数，则为整数槽绕组；如果每极每相槽数 q 不是整数，

则为分数数槽绕组。普通三相异步电机常采用整数槽绕组。

（7）根据线圈的结构特点，判断绕组的形式

对于单层绕组：

① 当 $q=2$ 时，如果每个线圈组由一个线圈构成，则为单层链式绕组；如果每个线圈组由两个线圈构成，小线圈外套大线圈，通常为单层同心式绕组或单层等元件绕组。

② 当 $q=3$ 时，如果有的线圈组由两个线圈构成，有的线圈组由一个线圈构成，则为单层交叉式绕组，如果每个线圈组由三个线圈构成，则为单层同心式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=3$ 时，多数情况下采用单层交叉式绕组。

③ 当 $q=4$ 时，如果每个线圈组由两个线圈构成，则为单层同心式绕组；如果线圈组由四个线圈构成，则为单层等元件式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=4$ 时，多数情况下采用单层同心式绕组。

④ 当 $q=5$ 时，如果有的线圈组由三个线圈构成，而有的线圈组由两个线圈构成，而且每相绕组线圈组的个数等于电机的极数 $2p$，则为单层同心式绕组；如果线圈组由五个节距相同的线圈构成，则为单层等元件式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=5$ 时，多数情况下采用单层同心式绕组。

⑤ 当 $q=6$ 时，如果每个线圈组均由三个线圈构成，而且每相绕组的线圈组的个数等于电机的极数 $2p$，则为单层同心式绕组。应当注意：当电机每极每相槽数 $q=6$ 时，多数情况下采用单层同心式绕组。

对于双层绕组：

如果在整个绕组接线图中，极相组（线圈组）旁标出的数字是连续的，则表示每个定子槽内都有线圈的上层边，所以该绕组应为双层绕组。

仅仅根据电机定子绕组的接线圆图还不能区分双层叠绕组与双层波绕组。但是参考电机的并联支路数 a，可以初步判别。双层叠绕组的并联支路数一般较多（$a_{max}=2p$），而双层波绕组的并联支路数一般较少（$a_{max}=2$）。

在三相异步电机中，双层叠绕组常用于中小型三相异步电机的定子，而双层波绕组常用于大中型三相异步电机的定子及绕线转子电机的转子。

4.3.2 定子绕组接线圆图识读实例

【例 4-7】 已知一台三相异步电机的定子绕组接线圆图如图 4-14 所示，该绕组为 60°相带的绕组。试判断该电机定子绕组的接线规律、种类、并联支路数 a、极数 $2p$、绕组的层数、定子槽数 Z_1，并估计绕组的形式。

解 （1）观察极相组（线圈组）之间的连接规律，判断绕组的种类

由于图 4-14 中各个极相组（线圈组）之间的连接规律是“头接头，尾接尾”，所以该绕组为显极式绕组。

（2）根据每相绕组中各个极相组（线圈组）之间的连接，判断绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，从该相绕组的首端 A 开始观察，发现是依次将 A 相绕组的全

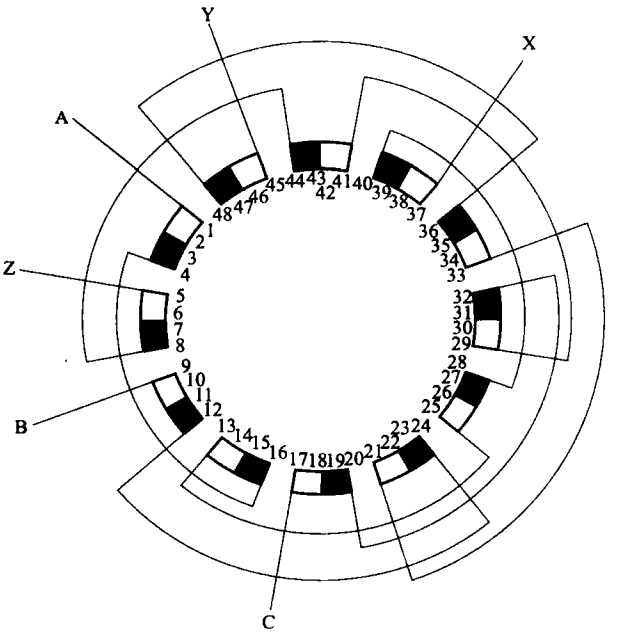


图 4-14　三相双层叠绕组接线圆图

（$Z_1=48$，$2p=4$，$a=1$）

部线圈组串联成一条支路，直至该相绕组的末端 X，所以该电机的并联支路数$a=1$。

（3）观察每相极相组（线圈组）的个数 n，判断电机的极数 $2p$

因为图 4-14 所示的三相交流电机，总共有 12 个极相组（线圈组），所以，每相的极相组（线圈组）的个数 $n=\dfrac{12}{3}=4$。

因为绕组为显极式绕组，所以

$$2p=n=4$$

（4）根据极相组（线圈组）旁标出的数字，判断绕组的层数

因为在整个绕组接线图中，极相组（线圈组）旁标出的数字是连续的，表示每个定子槽内都有线圈的上层边，所以该绕组应为双层绕组。

（5）根据极相组（线圈组）旁标出的数字和绕组的层数，判断定子槽数 Z_1

因为，对于双层绕组，极相组（线圈组）旁标出的最大数字即为定子槽数 Z_1，所以，该电机的定子槽数 $Z_1=48$。

（6）根据定子槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$，计算每极每相槽数 q

因为该绕组为 60°相带的绕组，所以该电机每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{48}{4\times3}=4$$

（7）根据线圈的结构特点，判断绕组的形式

因为该电机是双层绕组，如果该电机是中小型三相异步电机，估计是三相双层叠绕组。

【例 4-8】 已知一台三相异步电机的定子绕组接线圆图如图 4-15 所示，该绕组为 60°相带的绕组。试判断该电机定子绕组的接线规律、种类、并联支路数 a、极数 $2p$、绕组的层数、定子槽数 Z_1，并估计绕组的形式。

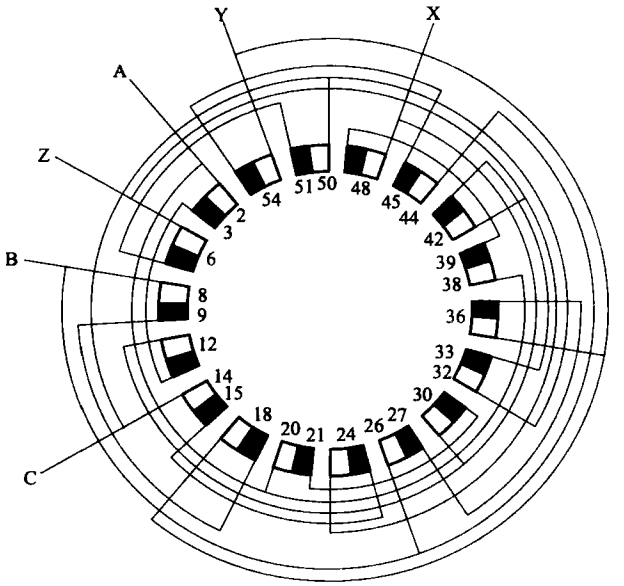


图 4-15 三相单层交叉式绕组接线圆图

（$Z_1=54$，$2p=6$，$a=3$）

解 （1）观察极相组（线圈组）之间的连接规律，判断绕组的种类

由于图 4-15 中各个极相组（线圈组）之间的连接规律是“头接头，尾接尾”，所以该绕组为显极式绕组。

（2）根据每相绕组中各个极相组（线圈组）之间的连接，判断绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，从该相绕组的首端 A 开始观察，发现是将 A 相绕组的全部线圈组分成了三条支路，并联后接到该相绕组的末端 X，所以该电机的并联支路数 $a=3$。

（3）观察每相极相组（线圈组）的个数 n，判断电机的极数 $2p$

因为图 4-15 所示的三相交流电机，总共有 18 个极相组（线圈组），所以，每相的极相组（线圈组）的个数 $n=\dfrac{18}{3}=6$。

因为绕组为显极式绕组，所以

$$2p=n=6$$

（4）根据极相组（线圈组）旁标出的数字，判断绕组的层数

因为在整个绕组接线图中，极相组（线圈组）旁标出的数字是断续的，表示有的定子槽内有线圈的“上层边”，有的定子槽内没有线圈的“上层边”，所以该绕组应为单层绕组（或单双层混合绕组）。

（5）根据极相组（线圈组）旁标出的数字和绕组的层数，判断定子槽数 Z_1

因为，对于单层绕组（或单双层混合绕组），极相组（线圈组）旁标出的最大数字为 54，所以，参考常用定子常用槽数，得出该电机的定子槽数 $Z_1=54$。

（6）根据定子槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$，计算每极每相槽数 q

因为该绕组为 60°相带的绕组，所以该电机每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{54}{6\times3}=3$$

（7）根据线圈的结构特点，判断绕组的形式

因为该电机的每极每相槽数 $q=3$，而且有的线圈组由两个线圈构成，有的线圈组由一个线圈构成，所以，估计该电机为单层交叉式绕组。

【例 4-9】 已知一台三相异步电机的定子绕组接线圆图如图 4-16 所示，该绕组为 60°相带的绕组。试判断该电机定子绕组的接线规律、种类、并联支路数 a、极数 $2p$、绕组的层数、定子槽数 Z_1，并估计绕组的形式。

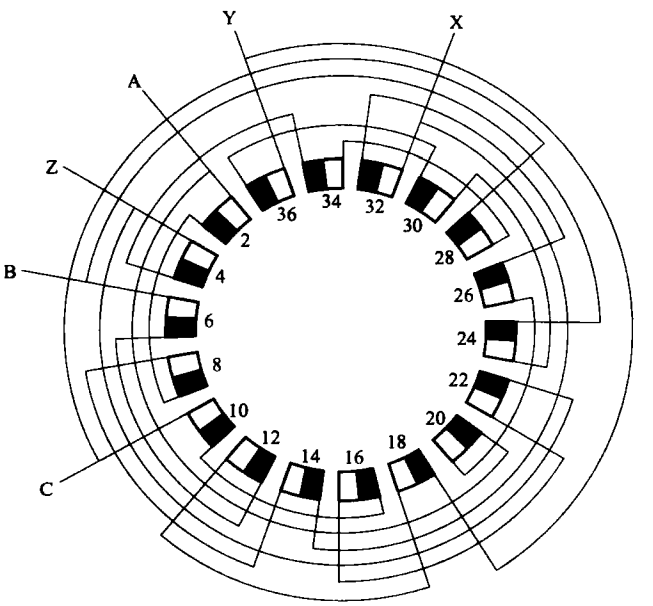


图 4-16　三相单层链式绕组接线圆图

（$Z_1=36$，$2p=6$，$a=2$）

解 （1）观察极相组（线圈组）之间的连接规律，判断绕组的种类

由于图 4-16 中各个极相组（线圈组）之间的连接规律是“头接头，尾接尾”，所以该绕组为显极式绕组。

（2）根据每相绕组中各个极相组（线圈组）之间的连接，判断绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，从该相绕组的首端 A 开始观察，发现是将 A 相绕组的全部线圈组分成了两条支路，并联后接到该相绕组的末端 X，所以该电机的并联支路数 $a=2$。

（3）观察每相极相组（线圈组）的个数 n，判断电机的极数 $2p$

因为图 4-16 所示的三相交流电机，总共有 18 个极相组（线圈组），所以，每相的极相组（线圈组）的个数 $n=\frac{18}{3}=6$。

因为绕组为显极式绕组，所以

$$2p=n=6$$

（4）根据极相组（线圈组）旁标出的数字，判断绕组的层数

因为在整个绕组接线图中，极相组（线圈组）旁标出的数字是断续的，则表示有的定子槽内有线圈的“上层边”，有的定子槽内没有线圈的“上层边”，所以该绕组应为单层绕组（或单双层混合绕组）。

（5）根据极相组（线圈组）旁标出的数字和绕组的层数，判断定子槽数 Z_1

因为，对于单层绕组（或单双层混合绕组），极相组（线圈组）旁标出的最大数字为 36，所以，参考常用定子常用槽数，得出该电机的定子槽数 $Z_1=36$。

（6）根据定子槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$，计算每极每相槽数 q

因为该绕组为 60°相带的绕组，所以该电机每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{6\times3}=2$$

（7）根据线圈的结构特点，判断绕组的形式

因为该电机的每极每相槽数 $q=2$，而且每个线圈组由一个线圈构成，所以，估计该电机为单层链式绕组。

【例 4-10】 已知一台三相异步电机的定子绕组接线圆图如图 4-17 所示，该绕组为 60°相带的绕组。试判断该电机定子绕组的接线规律、种类、并联支路数 a、极数 $2p$、绕组的层数、定子槽数 Z_1，并估计绕组的形式。

解 （1）观察极相组（线圈组）之间的连接规律，判断绕组的种类

由于图 4-17 中各个极相组（线圈组）之间的连接规律是“头接头，尾接尾”，所以该绕组为显极式绕组。

（2）根据每相绕组中各个极相组（线圈组）之间的连接，判断绕组的并联支路数 a

以 A 相绕组为例，从该相绕组的首端 A 开始观察，发现是将 A 相绕组的全部线圈组串联了一条支路，直至该相绕组的末端 X，所以该电机的并联支路数 $a=1$。

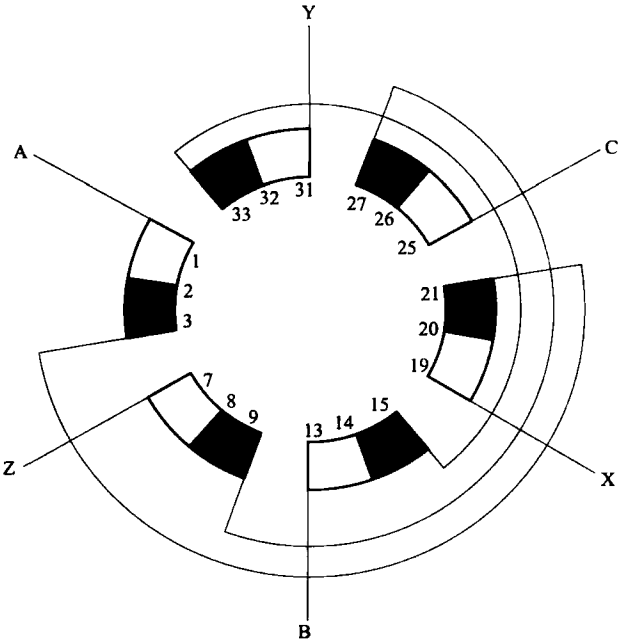


图 4-17　三相单层同心式绕组接线圆图

（$Z_1=36$，$2p=2$，$a=1$）

（3）观察每相极相组（线圈组）的个数 n，判断电机的极数 $2p$

因为图 4-17 所示的三相交流电机，总共有 6 个极相组（线圈组），所以，每相的极相组（线圈组）的个数 $n=\frac{6}{3}=2$。

因为绕组为显极式绕组，所以

$$2p=n=2$$

（4）根据极相组（线圈组）旁标出的数字，判断绕组的层数

因为在整个绕组接线图中，极相组（线圈组）旁标出的数字是断续的，则表示有的定子槽内有线圈的“上层边”，有的定子槽内没有线圈的“上层边”，所以该绕组应为单层绕组（或单双层混合绕组）。

（5）根据极相组（线圈组）旁标出的数字和绕组的层数，判断定子槽数 Z_1

因为，对于单层绕组（或单双层混合绕组），极相组（线圈组）旁标出的最大数字为 33，所以，参考常用定子常用槽数，得出该电机的定子槽数 $Z_1=36$。

（6）根据定子槽数 Z_1 和电机的极数 $2p$，计算每极每相槽数 q

因为该绕组为 60°相带的绕组，所以该电机每极每相槽数 q 为

$$q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{2\times3}=6$$

（7）根据线圈的结构特点，判断绕组的形式

因为该电机的每极每相槽数 $q=6$，而且每个线圈组均由三个线圈构成、每相绕组的线圈组的个数等于电机的极数 $2p$。所以，估计该电机为单层同心式绕组。

第5章

变极多速三相异步电机定子绕组图

5.1 变极多速三相异步电机的特点和分类 / 113
5.2 反向变极法 / 114
5.3 换相变极法 / 117
5.4 不同节距变极法 / 117
5.5 变极多速三相异步电机三相绕组的联结 / 120
5.6 变极多速三相异步电机绕组图实例 / 121

变极多速三相异步电机的特点和分类

5.1.1 变极多速三相异步电机的特点

通过不同的换接来改变笼型三相异步电机的定子绕组的极对数 p，可以改变笼型三相异步电机的旋转磁场的转速，从而改变转子的转速。这种通过改变定子绕组的极对数 p，而得到多种转速的电机，称为变极多速异步电机。

由三相异步电机的工作原理可知，三相异步电机转子绕组的极数必须与定子绕组的极数相同，因此变极调速时，极对数的改变必须在定子绕组和转子绕组上同时进行。由于笼型转子绕组本身没有固定的极数，它的极数随定子绕组的极数而改变，变换电机的极数时，仅改变定子绕组的极数即可，所以变极多速异步电机都采用笼型转子。

变极调速设备简单、运行可靠，是一种比较经济的调速方法，它属于有级调速电机，适用于不需要平滑调节转速的场合。

5.1.2 变极多速三相异步电机的分类

变极多速三相异步电机一般有以下三种类型。

① 在定子槽内放置一套绕组，改变其不同的接线组合，得到不同的极数，即单绕组变极多速电机，简称单绕组多速电机。

② 在定子槽内放置两套具有不同极对数的独立绕组，即双绕组双速电机。

③ 在定子槽内放置两套具有不同极对数的独立绕组，而每套绕组又可以有不同的接线组合，得到不同的极对数，即双绕组多速电机。

上述三种变极多速异步电机中，单绕组变极多速异步电机绕制简单、引出线头较少、用铜量也较少，所以应用最广泛。

5.1.3 变极多速三相异步电机的变极方法

单绕组变极多速异步电机的变极方法有以下三种。

① 反向变极法；

② 换相变极法；

③ 不同节距变极法。

以上三种单绕组变极多速异步电机的变极方法中，反向变极法是最常用的一种。

当单绕组变极多速异步电机的极数变更成整倍数关系时，称为倍极比变极多速异

步电机，如 2/4 极、4/8 极等；当单绕组变极多速异步电机的极数变更为非整倍数关系时，称为非倍极比变极多速异步电机，如 4/6 极、6/8 极等。

5.2 反向变极法

5.2.1 反向变极法的特点

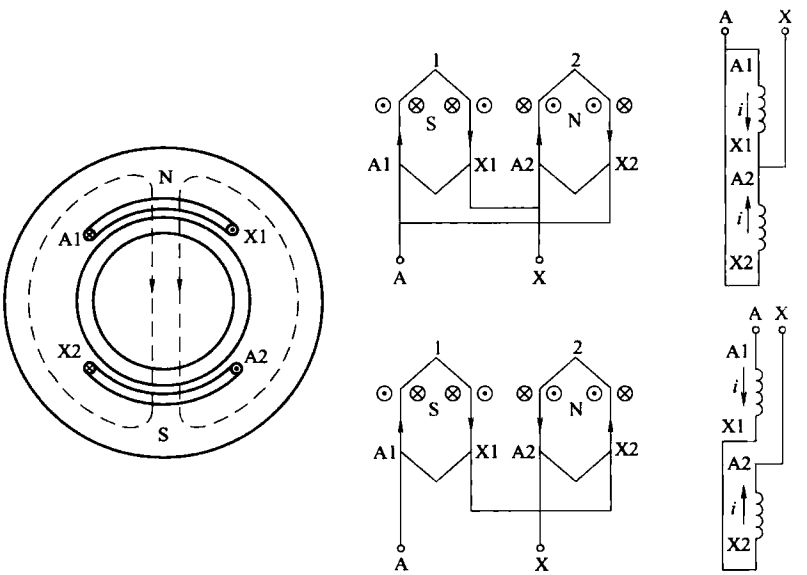
反向变极法的特点是，变极时，把每相绕组里的一半线圈中的电流反向，这个反向可以通过适当的接线变换来实现。反向变极法的优点是电机的引出线少、制造和控制均较方便。但是，各种极数不能同时得到较高的绕组分布系数，因而使电机的性能受到一定的影响。

5.2.2 反向变极的原理

下面通过两个实例分别介绍反向变极法的基本原理。

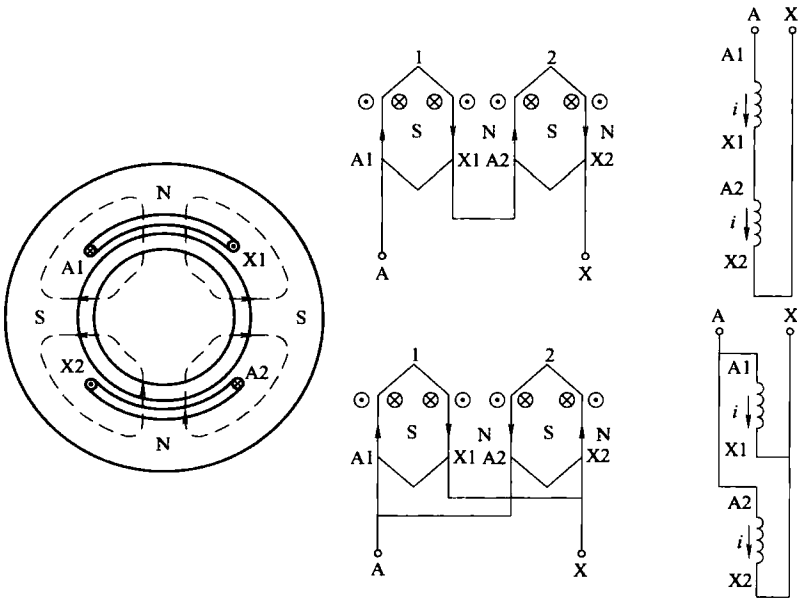
【例 5-1】 倍极比单绕组变极多速电机

图 5-1 和图 5-2 为同一台单绕组双速电机的定子绕组中一相绕组的简图，图中只



(a) 绕组布置及其磁场图　　(b) 展开图　　(c) 接线图

图 5-1　2/4 极电机反向变极法的原理图（2 极时）



(a) 绕组布置及其磁场图　　(b) 展开图　　(c) 接线图

图 5-2　2/4 极电机反向变极法的原理图（4 极时）

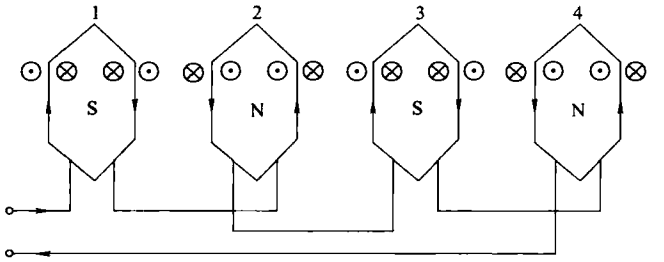
画出了 A 相绕组，它包含两个线圈（或线圈组）A1－X1 和 A2－X2。

在图 5-1 和图 5-2 的展开图中的⊗和⊙表示每个线圈边所产生的磁场方向（⊗表示磁力线进入纸面，⊙表示磁力线穿出纸面）。在图 5-1 中两个线圈反向并联或反向串联时，在电机的气隙中，可形成 2 极磁场。如果将两个线圈正向串联（又称庶极接法）或正向并联，如图 5-2 所示，其中一个线圈 A2－X2 中的电流改变了方向，在电机的气隙中则可形成 4 极磁场，即定子绕组的极数增加了 -倍。由此可见，在倍极比单绕组双速电机中，通常以磁极数少的极数作为基本极（60°相带绕组），如欲使磁极数倍增，应变换定子绕组的接线，使相邻线圈组中的电流反向。

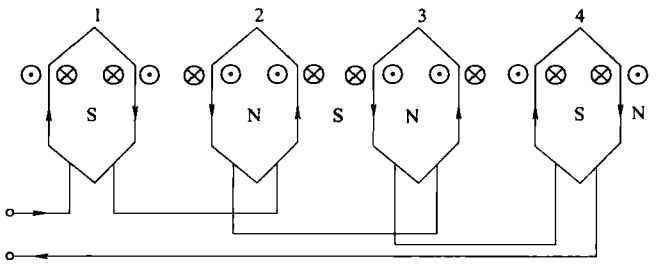
【例 5-2】 非倍极比单绕组变极多速电机

上述对倍极比单绕组变极的思路可以推广到非倍极比的情况。图 5-3 为 -台 4/6 极单绕组双速电机反向变极法的原理示意图，图中只画出一相绕组，它包含 4 个线圈（或线圈组），当 4 个线圈按照图 5-3（a）所示连接时，在电机的气隙中将产生 4 极磁场；如果将 4 个线圈的连接换成图 5-3（b）所示的形式，即将线圈 3 和线圈 4 中的电流反向，在电机的气隙中，则可产生 6 极磁场。

对于图 5-3（a）所示的 4 极电机，如果将线圈 2 和线圈 4 中的电流反向，则可以构成 4/8 极倍极比单绕组双速电机，其原理示意图如图 5-4 所示。由以上分析可知，反向变极法的特点是：在保证定子绕组各个线圈所属相别不变的条件下，通过接线的变化，改变部分线圈中的电流方向，从而达到变极的目的。

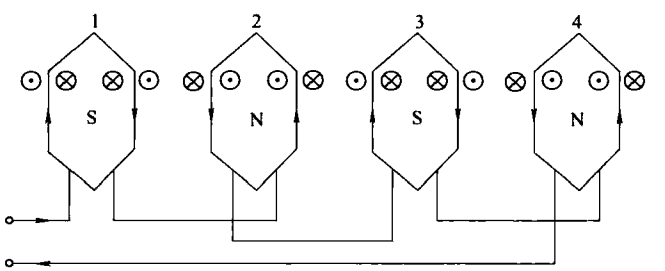


(a) 4极

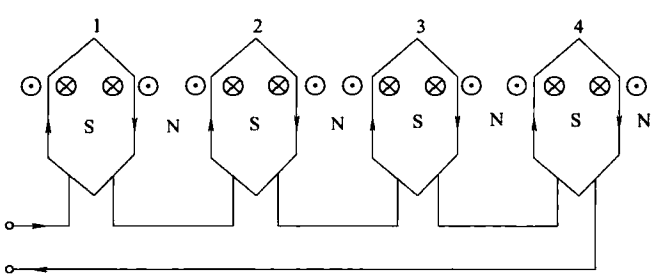


(b) 6极

图 5-3　4/6 极电机反向变极法的原理示意图



(a) 4极



(b) 8极

图 5-4　4/8 极电机反向变极法的原理示意图

5.3 换相变极法

反向变极法获得的单绕组多速电机绕组的优点是出线头较少（双速电机仅需6根），制造和控制均比较方便。但是绕组分布系数总是受到一定限制，两种极数不能同时做到较高的绕组分布系数，因而电机的性能受到一定影响。换相变极法就是针对这一问题而提出的另一种变极方法。

换相变极法与反向变极法的不同点在于：变极时不仅改变部分线圈的电流方向，而且改变某一部分线圈所属的相别。用换相变极法获得的单绕组多速异步电机绕组，不同极数都可保持较高的绕组分布系数，电机的性能较好，从而弥补了反向变极法的不足。

换相变极法的缺点是出线头较多，制造和控制不如反向变极法方便。因此在单绕组双速异步电机中，换相变极法很少被采用。但是，在单绕组三速异步电机中，这个缺点相对地不太明显，因而换相变极法有一定的应用。

5.4 不同节距变极法

5.4.1 不同节距变极法的特点

在槽电动势矢量图（又称槽电动势星形图）能得到三相对称的相绕组电动势的条件下，一套绕组采用两种不同的节距相结合，也可以达到变极的目的。这种变极方法称为不同节距变极法。用这种方法获得的单绕组三速异步电机出线头为9根，比换相变极法的出线头少，绕组的分布系数也比较高。

5.4.2 不同节距变极的原理

下面通过一个实例，介绍不同节距变极法的基本原理。

【例5-3】 单绕组变极三速电机

现有一台定子槽数 $Z_1=36$ 的三相异步电机，欲绕制成一台2/4/8极的单绕组三速异步电机。排列绕组时，如果选定2极为基本60°相带绕组，用庶极法获得4极，

那么用通常的反向变极法在4极的基础上再获得8极就不行了，但是，用不同节距变极法却可以再获得8极。

图5-5和图5-6分别示出了2/4/8极电机为2极和4极时一相绕组的槽电流图。图中实线为线圈上层边导体中的电流，虚线为线圈下层边导体中的电流，从图5-5和图5-6中可以看出，节距 $y=9$。

图5-5　2/4/8极电机2极时的槽电流图（一相）

（$Z_1=36$，$2p=2$）

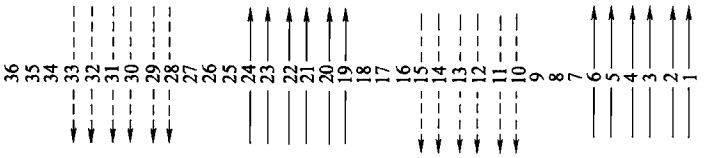


图5-6　2/4/8极电机4极时的槽电流图（一相）

（$Z_1=36$，$2p=4$）

现在的问题是：如何在庶极接法4极的基础上再获得8极？为此可仔细观察图5-6所示4极时的槽电流分布情况，如果设想4、5、6、10、11、12以及22、23、24、28、29、30，这十二个槽内电流能反向成为图5-7所示，显然一相绕组的槽电流就形成了8个极。同理，三相绕组的槽电流产生的磁场合成，则能形成8个极的旋转磁场。

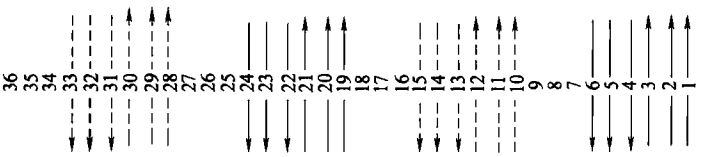


图5-7　2/4/8极电机8极时的槽电流图（一相）

（$Z_1=36$，$2p=8$）

为了使上述十二个槽电流能反向，而其余十二个槽电流不反向，可以把槽4、5、6内上层的导体与槽10、11、12内下层的导体构成一个线圈组，并将槽22、23、24内上层的导体与槽28、29、30内下层的导体构成一个线圈组，该两个线圈组为小线圈组，节距 $y_1=6$。然后再将剩下的槽1、2、3内上层的导体与槽13、14、15内下

层的导体构成一个线圈组，将槽 19、20、21 内上层的导体与槽 31、32、33 内下层的导体构成一个线圈组，该两个线圈组为大线圈组，节距 $y_2=12$。

按上述方法，可将一相绕组分成两个小线圈组和两个大线圈组，形成了两个不同

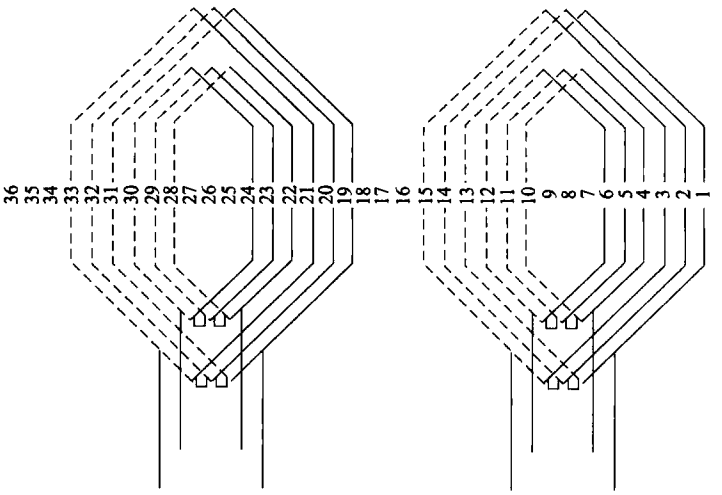


图 5-8　2/4/8 极单绕组三速电机一相绕组展开图

（$Z_1=36$，$y_1=6$，$y_2=12$）

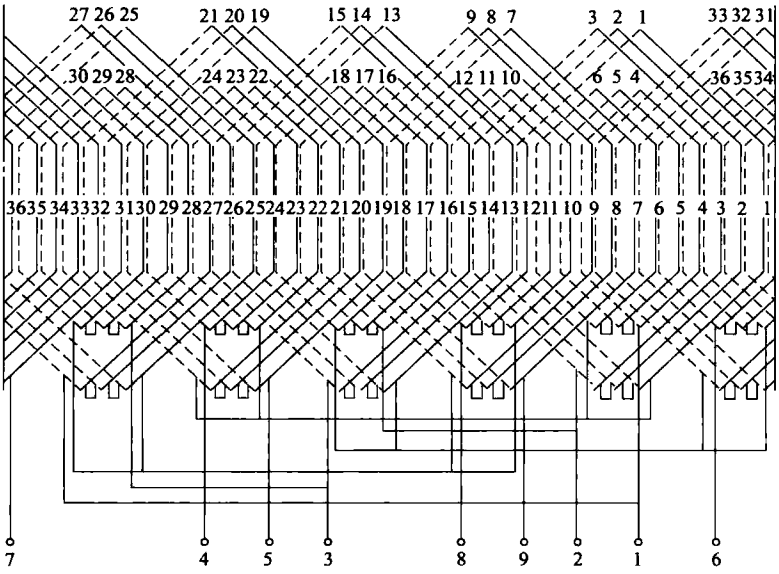


图 5-9　2/4/8 极单绕组三速电机三相绕组展开图

（$Z_1=36$，$2p-2/4/8$）

的节距。这种不同节距对 2、4 极槽电流分布没有影响，但却保证了在庶极接法的 4 极基础上能够再通过反向获得 8 极。

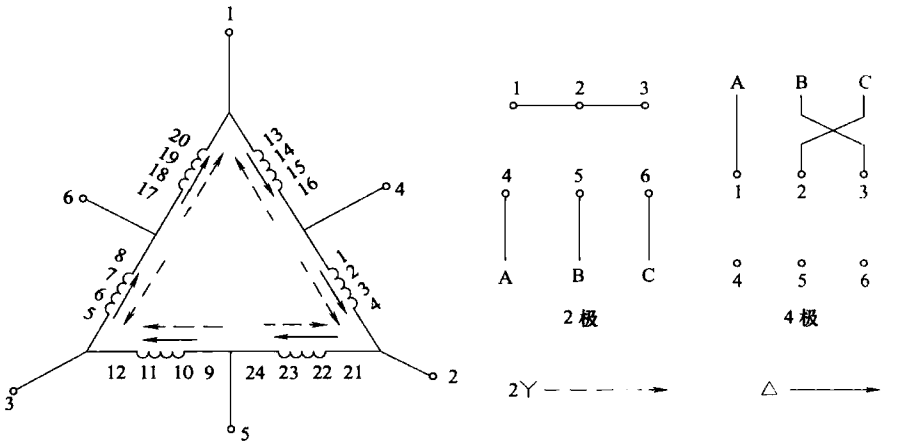
采用反向变极法和不同节距变极法得到的 36 槽 2/4/8 极单绕组三速异步电机一相绕组的展开图如图 5-8 所示，其三相绕组的展开图如图 5-9 所示。

变极多速三相异步电机三相绕组的联结

采用反向变极法变极时，每相绕组分成两半，每半称为“半相绕组”。每相的两个半相绕组可以采用串联或并联（见第 2 章图 2-17 和图 2-18）两种不同的连接法。这样，三相之间一般可以采用一路星形（Y）、两路星形（2Y）和一路三角形（△）联结。从少极数到多极数一般采用下列几种连接方法：2Y/△，2Y /Y，△/2Y，Y/2Y。其中常用的连接方法是 2Y/△和 2Y/Y两种，引出线头只有 6 根。

5.5.1 单绕组双速电机 2Y/△联结

单绕组双速电机 2 Y/△联结，如图 5-10 所示。当定子绕组从两路星形（2Y）联结改接成一路三角形（△）联结时，极对数增加一倍，转速降低一半。在图 5-10（a）中，虚线箭头表示 2 极（2Y）时的电流方向，实线箭头表示 4 极（△）时的电流方向。



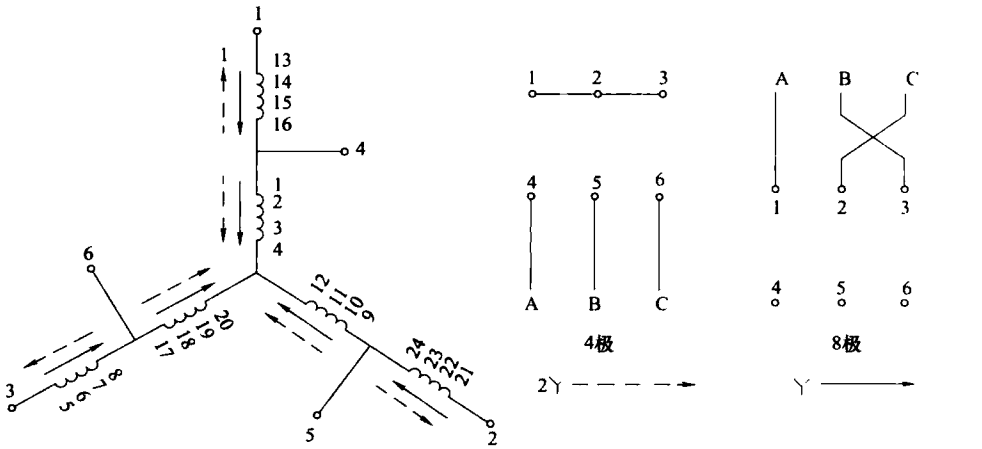
(a) 三相绕组接线简图　　(b) 2极时引出线的接法　　(c) 4极时引出线的接法

图 5-10　单绕组双速电机 2Y/△联结

5.5.2 单绕组双速电机 2Y/Y联结

单绕组双速电机 2Y/Y联结，如图 5-11 所示。在 4 极时为两路星形联结（2Y）；在 8 极时改接为一路星形联结（Y）。在图 5-11（a）中，虚线箭头表示 4 极时的电流方向，实线箭头表示 8 极时的电流方向。

在倍极比单绕组双速电机中，少数极时的定子绕组通常是 60°相带，三相出线端相互差 120°电角度；当绕组改接成倍数极时，相带宽度倍增成为 120°电角度，三相出线端则彼此相差 240°电角度，也就是说，变速后的相序与变速前的相序相反，所以在变极调速时，为了转向不变，应将接至电机的三根电源线对调其中任意两根，如图 5-10 所示。



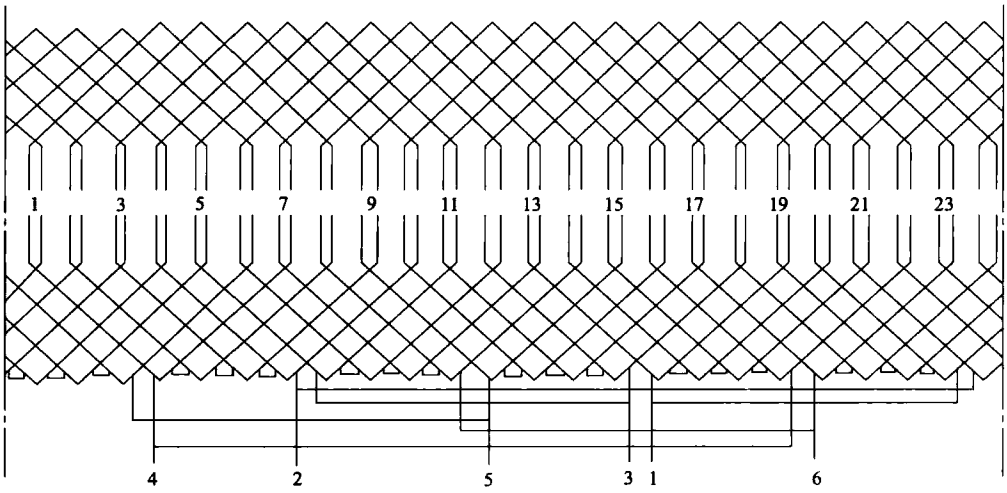
(a) 三相绕组接线简图　(b) 4极时引出线的接法　(c) 8极时引出线的接法

图 5-11　单绕组双速电机 2Y/Y联结

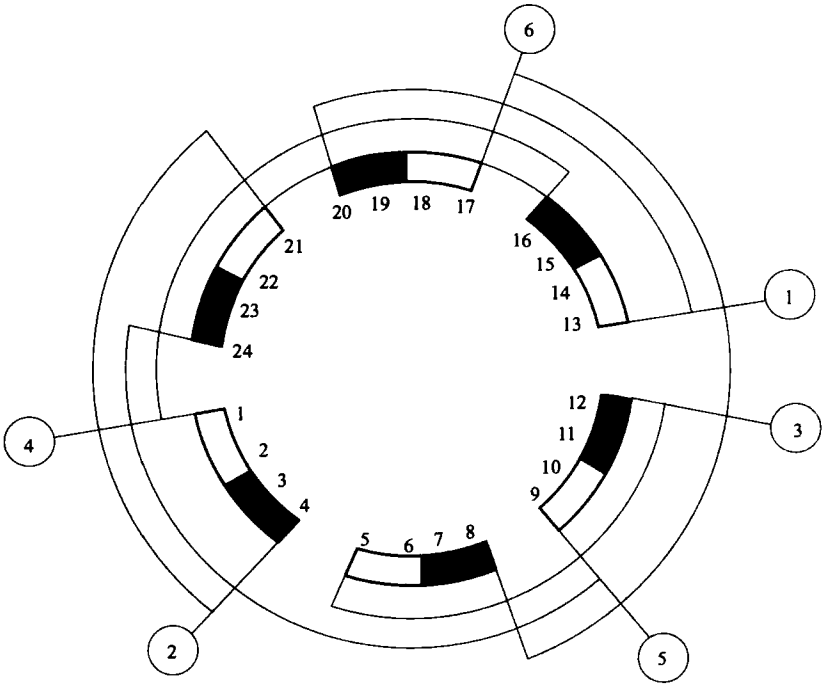
5.6 变极多速三相异步电机绕组图实例

5.6.1 反向变极的绕组图

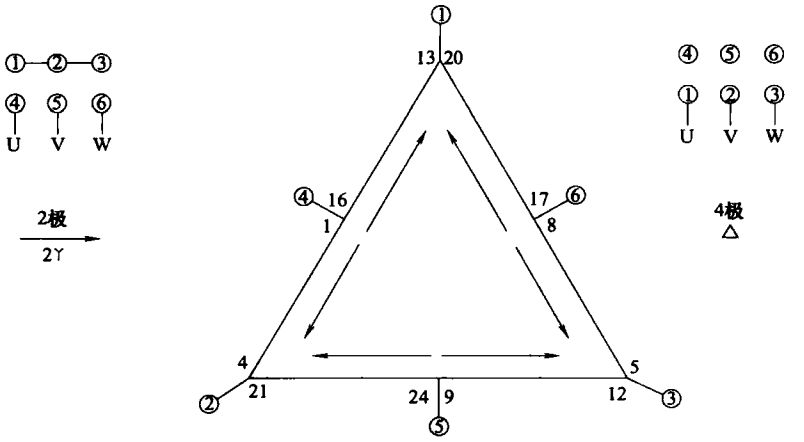
【例 5-4】 24 槽 2/4 极、2 Y/△接法绕组展开图、接线圆图与接线简图（见图 5-12）。



（a）绕组展开图



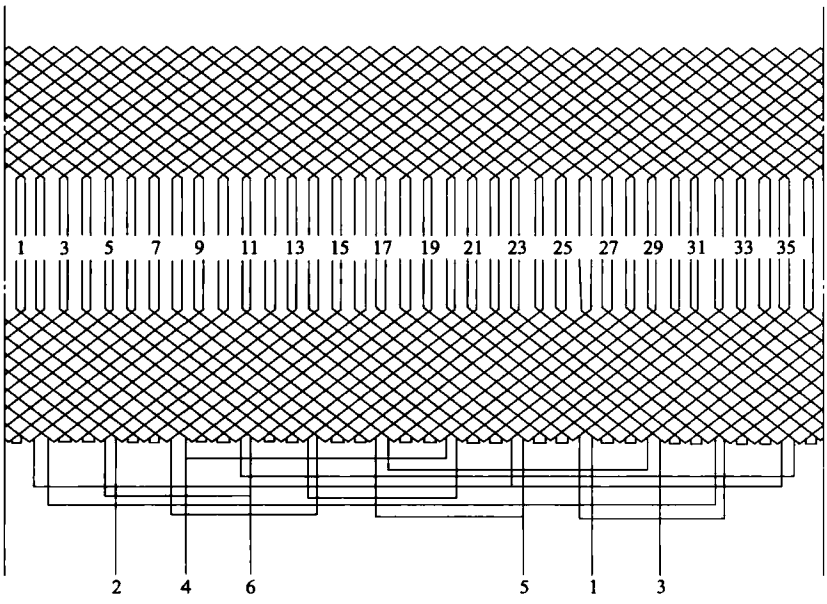
（b）接线圆图



(c) 接线简图

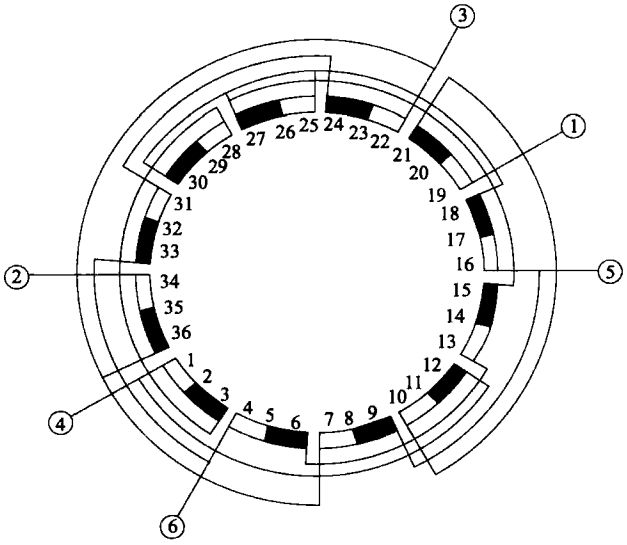
图 5-12　24 槽 2/4 级、2Y/△接法绕组展开图、接线圆图与接线简图

($Z_1=24$，2/4 极，2Y/△，$y=1-7$)

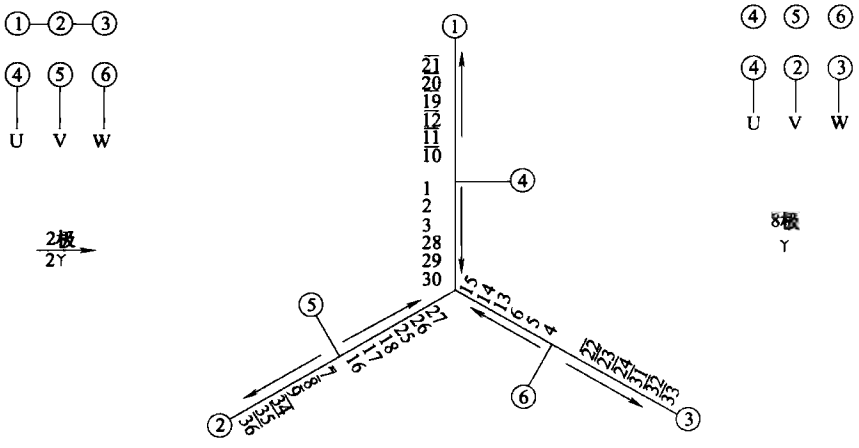


(a) 绕组展开图

图 5-13



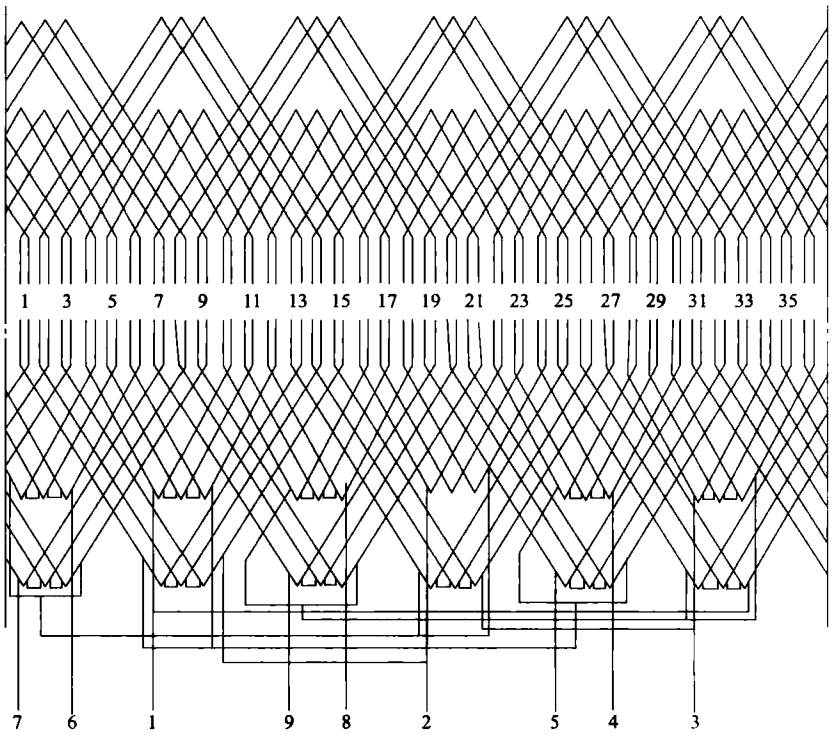
(b) 接线圆图



(c) 接线简图

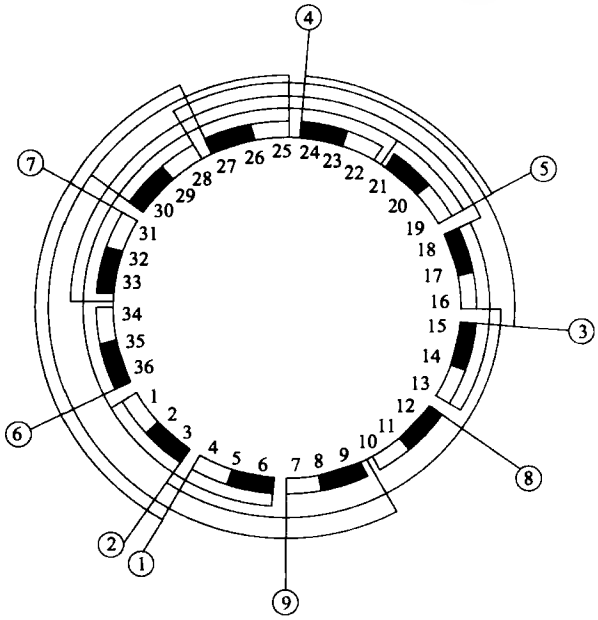
图 5-13　36 槽 2/8 极、2Y/Y接法绕组展开图、接线圆图与接线简图

($Z_1=36$，2/8 极，2Y/Y，$y=1-16$)



(a) 绕组展开图

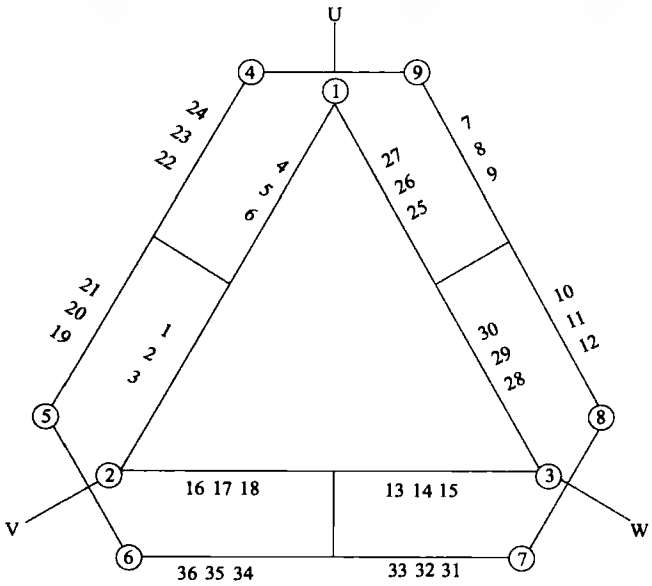
($Z_1=36$，8/4/2 极，2Y/2△ 2△，$y=\frac{1}{1-13}\frac{7}{}$)



(b) 接线圆图

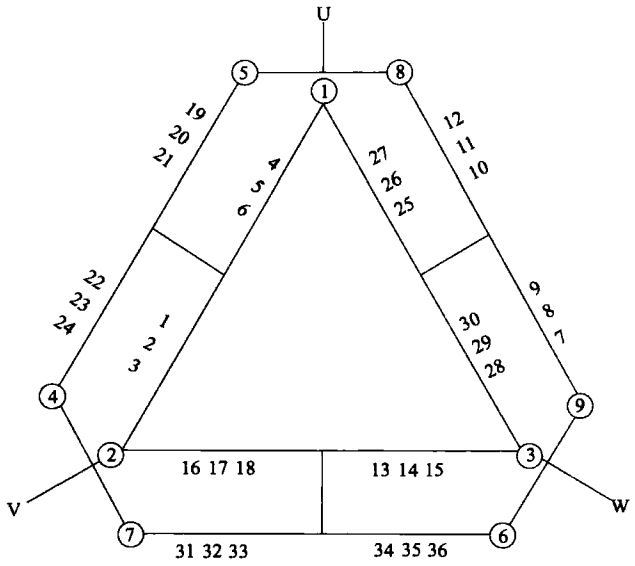
($Z_1=36$，2/4/8 极，2△/2△/2Y，$y=\frac{1-7}{1-13}$)

图 5-14



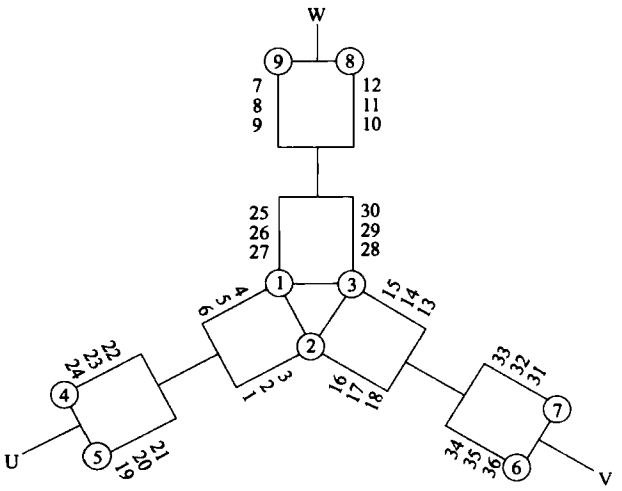
(c) 接线简图(一)

($Z_1=36$，2 极，2△，$y=\frac{1-7}{1-13}$)



(d) 接线简图(二)

($Z_1=36$，4 极，2△，$y=\frac{1-7}{1-13}$)



(e) 接线简图(三)

($Z_1=36$，8 极，2Y，$y=\frac{1-7}{1-13}$)

图 5-14　36 槽 2/4/8 极、2 △/2 △/2Y 接法绕组展开图、接线圆图与接线简图

【例 5-5】 36 槽 2/8 极、2 丫/丫接法绕组展开图、接线圆图与接线简图（见图 5-13）。

5.6.2　不同节距变极的绕组图

【例 5-6】 36 槽 2/4/8 极、2△ /2△/2 丫接法绕组展开图、接线圆图与接线简图（见图 5-14）。

第6章

单相异步电机定子绕组展开图

6.1 单相异步电机的同心式绕组 / 131
6.2 单相异步电机的正弦绕组 / 131
6.3 单相异步电机的罩极式绕组展开图 / 139

6.1 单相异步电机的同心式绕组

单相异步电机的同心式绕组是由几个轴线重合而节距（又称跨距）不同的线圈串联组成的，每个线圈组中各个线圈具有相同的匝数。

由于电阻分相启动单相异步电机和电容分相启动单相异步电机的运行性能主要取决于主绕组（因为副绕组不参与运行），通常主绕组的线圈数目比副绕组的线圈数目多，而且主绕组线圈的匝数比副绕组线圈的匝数多，主绕组电磁线的截面积比副绕组电磁线的截面积大。

对于电容运转电机和双值电容电机，由于主、副绕组都参与运行，故两套绕组的线圈数目、线圈匝数及电磁线截面积均基本相同。

6.2 单相异步电机的正弦绕组

6.2.1 正弦绕组的构成

单相异步电机的正弦绕组一般都采用同心式绕组结构，但其特点是组成每一个极相组（线圈组）的各个线圈的匝数不相等。其具体要求是使属于同一相绕组的各槽内的导体数按正弦规律分布。这样，当同一相电流流过该相所有匝数不等的同心式线圈时，由于各槽中电流之和与槽内导体数成正比，故使槽电流分布也符合正弦波形，进而使绕组建立的磁场空间分布波形也接近正弦波形，所以称这种结构的绕组为正弦绕组。

正弦绕组是一种高精度的特殊绕组，其产生的磁动势波形近似为正弦波形。因此，正弦绕组能有效地削弱气隙磁场中的高次谐波，使电机气隙磁通的分布尽可能接近正弦波，从而达到降低电机杂散损耗和电磁噪声、提高效率、改善启动性能的良好效果，以及使电机具有良好的运行特性。

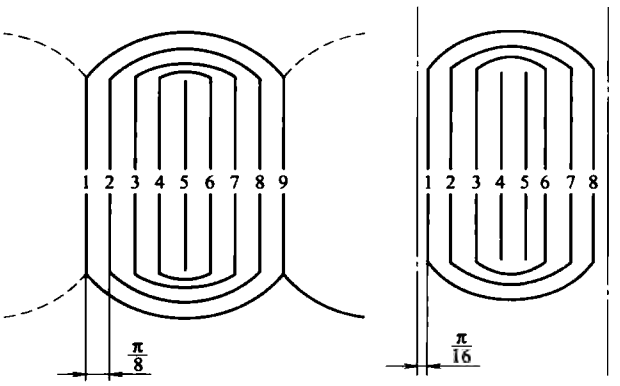
正弦绕组的主要缺点是：由于各线圈的匝数不同，使线圈绕制工艺复杂、费工时，有些槽的槽满率较低，降低了铁芯的利用率。

6.2.2 正弦绕组的种类及各槽内导体的分配

下面通过一个具体实例，介绍正弦绕组的种类及各槽内导体分配方案。

现以每极 8 槽（即极距 $\tau=8$）的单相异步电机为例，它在槽导体分配上有两大类，共 5 种方案。

A 类正弦绕组如图 6-1（a）所示，它共有 3 种分配方案。A 类的特点如下。



(a) A类　　(b) B类

图 6-1　正弦绕组的类型

① 跨距最大的线圈有 1/2 导体放在另一个磁极下。

② 同心式，各线圈的跨距均为偶数。

③ 各线圈匝数不等，跨距越大，匝数越多。

④ 根据不同的槽导体分配情况，有三种细别：

a. 仅有 2 个线圈，即槽 1～9、槽 2～8。其分配比例是

槽 1～9：
$$\frac{1}{2}\cos 0^\circ = 0.50 \rightarrow \frac{0.5}{1.42} = 35.2\%$$

槽 2～8：
$$\cos\frac{\pi}{\tau} = \cos\frac{\pi}{8} = 0.92 \rightarrow \frac{0.92}{1.42} = 64.8\%$$

$$\sum = 0.5 + 0.92 = 1.42$$

b. 包括 3 个线圈，即槽 1～9、槽 2～8、槽 3～7。其分配比例是

槽 1～9：
$$\frac{1}{2}\cos 0^\circ = 0.5 \rightarrow \frac{0.5}{2.13} = 23.5\%$$

槽 2～8：
$$\cos\frac{\pi}{\tau} = \cos\frac{\pi}{8} = 0.92 \rightarrow \frac{0.92}{2.13} = 43.2\%$$

槽 3～7：
$$\cos\frac{2\pi}{\tau} = \cos\frac{2\pi}{8} = 0.71 \rightarrow \frac{0.71}{2.13} = 33.3\%$$

$$\sum = 0.5 + 0.92 + 0.71 = 2.13$$

c. 包括 4 个线圈，即槽 1～9、槽 2～8、槽 3～7、槽 4～6。其分配比例是

槽 1～9：$\frac{1}{2}\cos 0°=0.5\rightarrow\frac{0.5}{2.51}=19.9\%$

槽 2～8：$\cos\frac{\pi}{\tau}=\cos\frac{\pi}{8}=0.92\rightarrow\frac{0.92}{2.51}=36.7\%$

槽 3～7：$\cos\frac{2\pi}{\tau}=\cos\frac{2\pi}{8}=0.71\rightarrow\frac{0.71}{2.51}=28.3\%$

槽 4～6：$\cos\frac{3\pi}{\tau}=\cos\frac{3\pi}{8}=0.38\rightarrow\frac{0.38}{2.51}=15.1\%$

$$\sum=0.5+0.92+0.71+0.38=2.51$$

B类正弦绕组如图 6-1（b）所示，它共有两种分配方案。B类的特点如下。

① 全部线圈处在同一个磁极下。

② 同心式，各线圈的跨距均为奇数。

③ 各线圈匝数不等，跨距越大，匝数越多。

④ 根据不同的槽导体分配情况，有两种细别（由于线圈槽 4～5 的跨距过小，嵌线困难，且会使绕组系数下降，故放弃不用）：

a. 包括 2 个线圈，即槽 1～8、槽 2～7。其分配比例为

槽 1～8：$\cos\frac{\pi}{2\tau}=\cos\frac{\pi}{2\times 8}=0.98\rightarrow\frac{0.98}{1.81}=54.1\%$

槽 2～7：$\cos\frac{3\pi}{2\tau}=\cos\frac{3\pi}{2\times 8}=0.83\rightarrow\frac{0.83}{1.81}=45.9\%$

$$\sum=0.98+0.83=1.81$$

b. 包括 3 个线圈，即槽 1～8、槽 2～7、槽 3～6。其分配比例为

槽 1～8：$\cos\frac{\pi}{2\tau}=\cos\frac{\pi}{2\times 8}=0.98\rightarrow\frac{0.98}{2.37}=41.4\%$

槽 2～7：$\cos\frac{3\pi}{2\tau}=\cos\frac{3\pi}{2\times 8}=0.83\rightarrow\frac{0.83}{2.37}=35.0\%$

槽 3～6：$\cos\frac{5\pi}{2\tau}=\cos\frac{5\pi}{2\times 8}=0.56\rightarrow\frac{0.56}{2.37}=23.6\%$

$$\sum=0.98+0.83+0.56=2.37$$

在正弦绕组中，各个同心线圈的匝数是不相等的，每个槽内放置的线圈的匝数占每相每极总匝数的百分比可按有关公式计算，也可查表求得，表 6-1 为常用正弦绕组分布表。

表 6-1 常用正弦绕组分布表

序号	绕组系数	每极槽数	每极绕组分布																		
			槽号																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0.75	3	50	50	50	50															
2	0.828	4	41.4	58.6		58.6	41.4														
3	0.856	6	57.7	42.3			42.3	57.7													

续表

序号	绕组系数	每极槽数	每极绕组分布																		
			槽号																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
4	0.775	6	50	36.6	13.4	13.4	36.6	50													
5	0.915	6	36.6	63.4				63.4	36.6												
6	0.804	6	26.8	46.4	26.8		26.8	46.4	26.8												
7	0.912	8	54.2	45.8					45.8	54.2											
8	0.827	8	41.1	35.1	23.8			23.8	35.1	41.1											
9	0.950	8	35.2	64.8						64.8	35.2										
10	0.870	8	23.5	43.4	33.1				33.1	43.4	23.5										
11	0.796	8	19.9	36.8	28	15.3		15.3	28	36.8	19.9										
12	0.960	9	34.7	65.3							65.3	34.7									
13	0.893	9	22.7	42.6	34.7					34.7	42.6	22.7									
14	0.820	9	18.5	34.7	28.3	18.5			18.5	28.3	34.7	18.5									
15	0.928	9	52.2	47.8						47.8	52.2										
16	0.856	9	39.5	34.8	25.7				25.7	34.8	39.5										
17	0.793	9	34.6	30.6	22.7	12.1		12.1	22.7	30.6	34.6										
18	0.959	12	51.8	48.2									48.2	51.8							
19	0.910	12	36.6	34.1	29.3							29.3	34.1	36.6							
20	0.855	12	29.9	27.8	24	18.3					18.3	24	27.8	29.9							
21	0.806	12	26.8	25	21.4	16.5	10.3			10.3	16.5	21.4	25	26.8							
22	0.783	12	25.9	24.1	20.7	15.9	10.0	3.4	3.4	10	15.9	20.7	24.1	25.9							
23	0.978	12	34.1	65.9										65.9	34.1						
24	0.936	12	21.4	41.4	37.2								37.2	41.4	21.4						
25	0.883	12	16.4	31.8	28.5	23.3						23.3	28.5	31.8	16.4						
26	0.829	12	14.1	27.3	24.5	20	14.1				14.1	20	24.5	27.3	14.1						
27	0.790	12	13.2	25.4	22.8	18.6	13.2	6.8		6.8	13.2	18.6	22.8	25.4	13.2						
28	0.947	16	35.1	33.8	31.1											31.1	33.8	35.1			
29	0.910	16	27.6	26.5	24.5	21.4									21.4	24.5	26.5	27.6			
30	0.869	16	23.5	22.6	20.8	18.2	14.9							14.9	18.2	20.8	22.6	23.5			
31	0.829	16	21.1	20.4	18.7	16.4	13.4	10					10	3.4	16.4	18.7	20.4	21.1			
32	0.798	16	19.9	19.2	17.6	15.4	12.7	9.4	5.8			5.8	9.4	12.7	15.4	17.6	19.2	19.9			
33	0.963	16	20.8	40.8	38.4												38.4	40.8	20.8		
34	0.929	16	15.5	30.3	28.5	25.7										25.7	28.5	30.3	15.5		
35	0.889	16	12.7	24.9	23.4	21.1	17.9								17.9	21.1	23.4	24.9	12.7		
36	0.848	16	11.1	21.8	20.5	18.5	15.7	12.4						12.4	15.7	18.5	20.5	21.8	11.1		
37	0.812	16	10.3	20	18.9	17.2	14.4	11.3	7.9				7.9	11.3	14.4	17.2	18.9	20	10.3		

续表

序号	绕组系数	每极槽数	每极绕组分布 槽号																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
38	0.927	18	27	26.2	24.6	22.2											22.2	24.6	26.2	27	
39	0.892	18	22.7	22	20.6	18.6	16.1									16.1	18.6	20.6	22	22.7	
40	0.855	18	20.1	19.5	18.2	16.5	14.2	11.5							11.5	14.2	16.5	18.2	19.5	20.1	
41	0.821	18	18.5	17.9	16.8	15.2	13.2	10.6	7.8					7.8	10.6	13.2	15.2	16.8	17.9	18.5	
42	0.795	18	17.6	17.1	16	14.5	12.5	10.2	7.5	4.6			4.6	7.5	10.2	12.5	14.5	16	17.1	17.6	
43	0.943	18	15.2	29.9	28.6	26.3												26.3	28.6	29.9	15.2
44	0.910	18	12.3	24.3	23.2	21.3	18.9										18.9	21.3	23.2	24.3	12.3
45	0.873	18	10.6	20.9	20	18.4	16.4	13.7								13.7	16.4	18.4	20	20.9	10.6
46	0.837	18	9.6	18.9	18.1	16.7	14.7	12.4	9.6						9.6	12.4	14.7	16.7	18.1	18.9	9.6
47	0.806	18	9.0	17.8	17	15.7	13.8	11.6	9.9	6.1				6.1	9.9	11.6	13.8	15.7	17	17.8	9.0

注：表中数字为各槽内同心线圈的匝数占每级总匝数的百分数。

6.2.3 单相正弦绕组展开图的绘制

图 6-2 是以百分数表示的正弦绕组各槽中导体分布图（图中将主绕组槽内导体数最多的作为 100%），与之对应的正弦绕组展开图如图 6-3 所示。当同一槽内嵌有主、副绕组两个线圈边时，一般将主绕组放置在槽的下层，将副绕组放置在槽的上层，

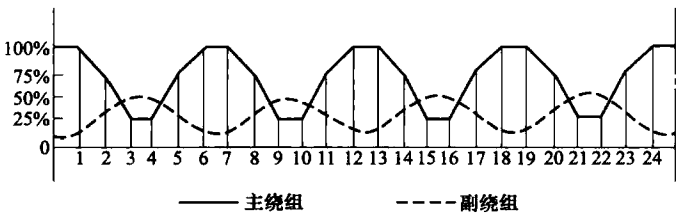


图 6-2 24 槽 4 极正弦绕组各槽导体分布图

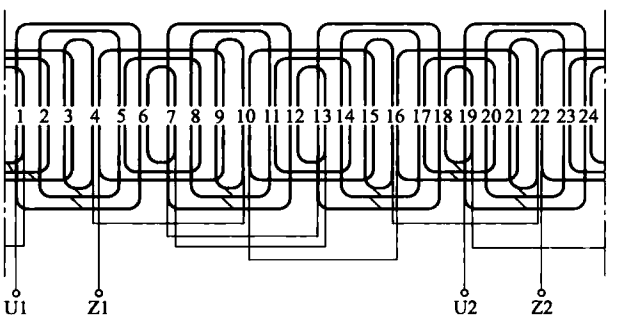


图 6-3 24 槽 4 极正弦绕组展开图

上、下层之间应垫入层间绝缘。

6.2.4 单相正弦绕组展开图实例

【例 6-1】 单相 2 极 12 槽正弦绕组 1 路接法展开图（见图 6-4 和图 6-5）

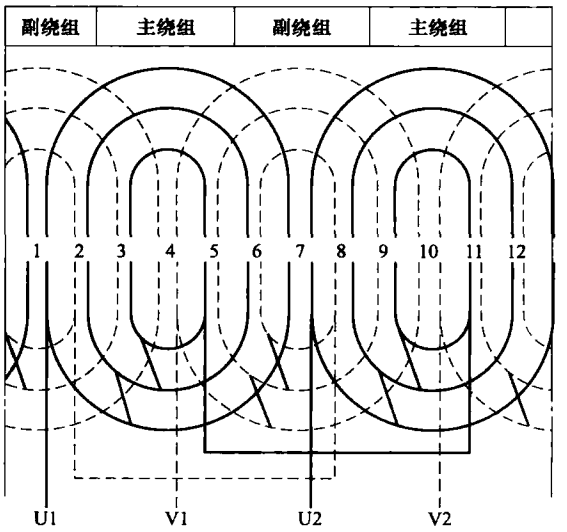


图 6-4 单相 2 极 12 槽正弦绕组 1 路接法展开图

U1，U2—分别为主绕组的首端及末端；

V1，V2－分别为副绕组的首端及末端

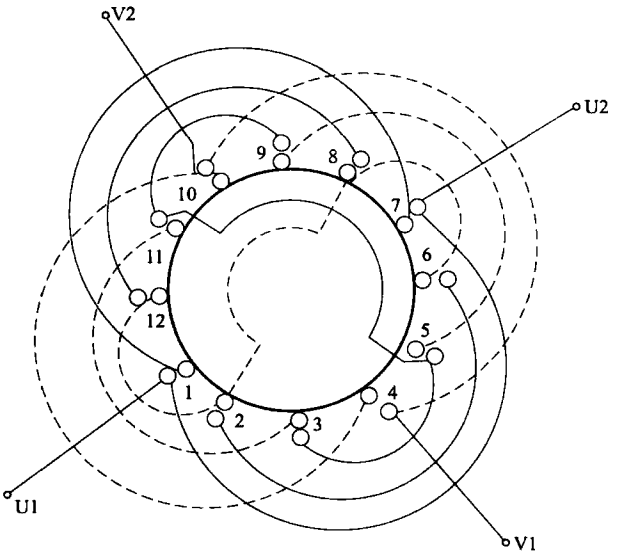


图 6-5 2 级 12 槽正弦绕组 1 路接法端部分布图

【例 6-2】 单相 2 极 24 槽正弦绕组 1 路接法展开图（1）（见图 6-6）

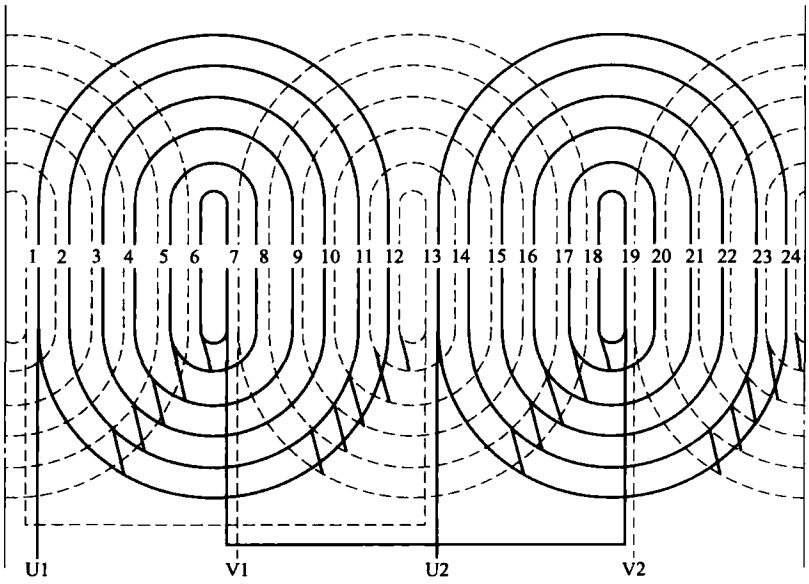


图 6-6 单相 2 极 24 槽正弦绕组 1 路接法展开图（1）

【例 6-3】 单相 2 极 24 槽正弦绕组 1 路接法展开图（2）（见图 6-7）

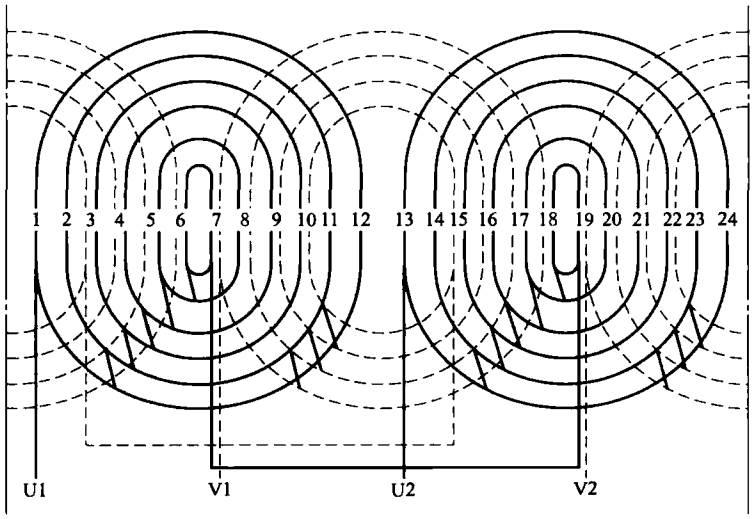


图 6-7 单相 2 极 24 槽正弦绕组 1 路接法展开图（2）

【例 6-4】 单相 2 极 24 槽正弦绕组 1 路接法展开图（3）（见图 6-8）

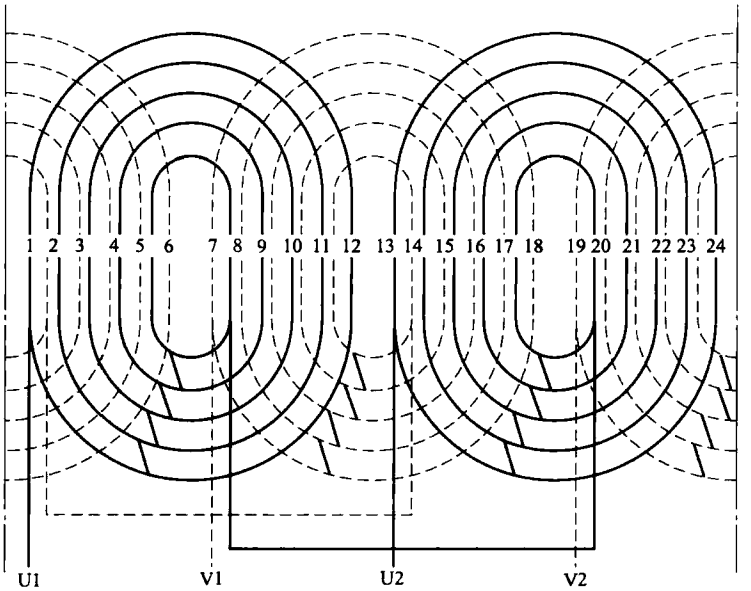


图 6-8　单相 2 极 24 槽正弦绕组 1 路接法展开图（3）

【例 6-5】 单相 4 极 36 槽正弦绕组 1 路接法展开图（见图 6-9）

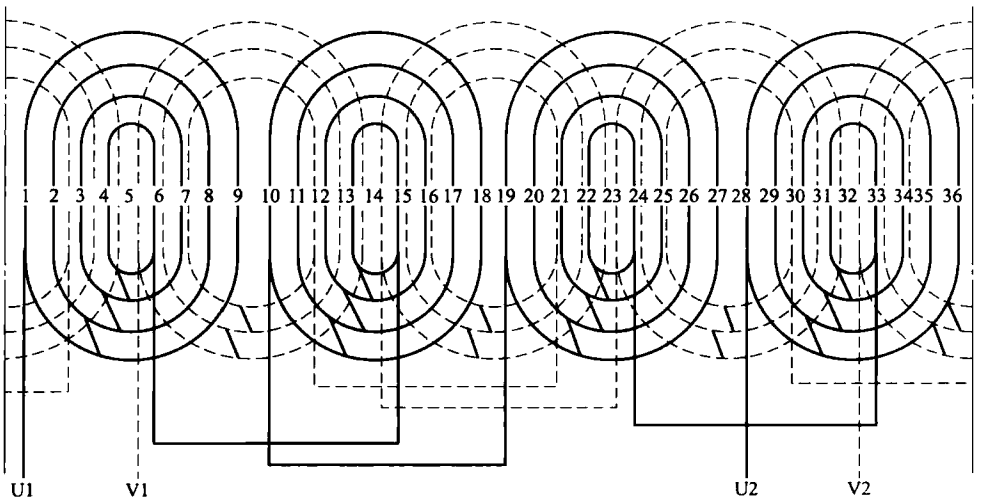


图 6-9　单相 4 极 36 槽正弦绕组 1 路接法展开图

【例 6-6】 单相 4 极 36 槽正弦绕组 2 路接法展开图（见图 6-10）

【例 6-7】 单相 4 极 36 槽正弦绕组 4 路接法展开图（见图 6-11）

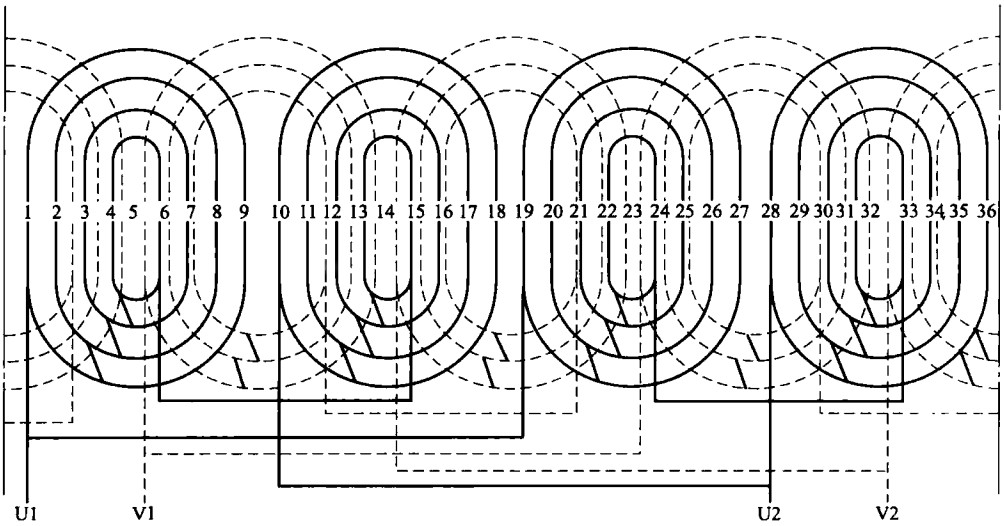


图 6-10　单相 4 极 36 槽正弦绕组 2 路接法展开图

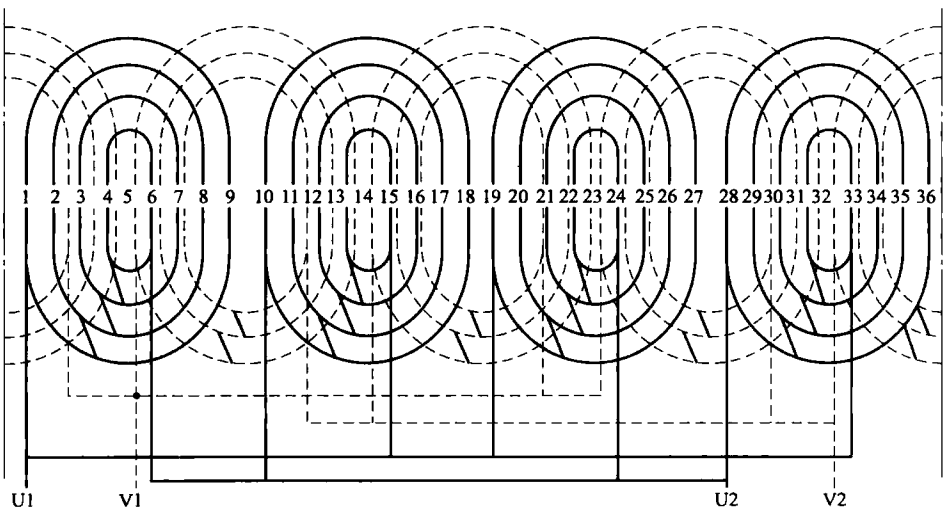


图 6-11　单相 4 极 36 槽正弦绕组 4 路接法展开图

6.3 单相异步电机的罩极式绕组展开图

罩极式单相异步电机按定子结构可分为凸极式和隐极式两种。

凸极式罩极单相异步电机的主绕组是集中绕组，套在定子磁极上；副绕组是一个

短路环，套在磁极极靴的一部分。

隐极式罩极单相异步电机的主、副绕组都是分布绕组，分别嵌放在定子铁芯的槽内。为了保证电机性能良好，应使主、副绕组的轴线在空间相隔一定的电角度（一般为 40°～ 60°）。其副绕组串联后自行短路，故称为罩极线圈。

隐极式罩极单相异步电机定子绕组展开图如图 6-12 所示。为了改善电机的启动性能和运行性能，隐极式单相罩极异步电机的主绕组也可按正弦规律分布在各槽中。

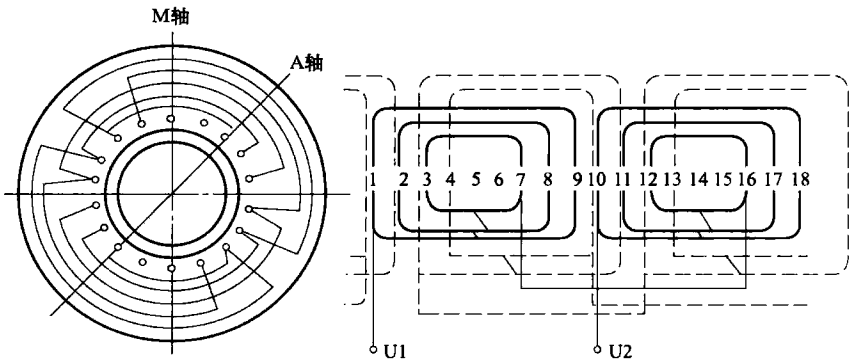


图 6-12　18 槽 2 极隐极式单相罩极异步电机定子绕组展开图

隐极式罩极单相异步电机的副绕组是闭合绕组，故其线圈的匝数很少（一般仅几匝），而其电磁线截面积很大。该绕组的线圈可以集中放在两个槽内，也可分散地嵌在较多的槽内。

直流电机电枢绕组展开图

7.1 直流电机电枢绕组的分类 / 143
7.2 叠绕组展开图的绘制 / 143
7.3 波绕组展开图的绘制 / 149
7.4 换向极与换向极绕组 / 155
7.5 补偿绕组 / 156
7.6 直流电机常用电枢绕组展开图实例 / 157

7.1 直流电机电枢绕组的分类

电枢绕组是电机的一个重要部件，其制造工艺比较复杂，在运行中容易发生故障。因此在设计绕组时，应使一定的导体数能产生较大电动势、通过一定电流而又尽量节约有色金属及绝缘材料，并要求结构简单、便于制造检修及运行安全可靠。对直流电机的电枢绕组来说还要保证换向良好。

按照绕组的连接方法，直流电机的电枢绕组可分为五种形式：①单叠绕组；②复叠绕组；③单波绕组；④复波绕组；⑤蛙形绕组，即叠绕和波绕混合绕组，其中单叠和单波绕组是最基本的。各种绕组的特征在于连接规律不同，因而形成了不同数目的并联支路。

7.2 叠绕组展开图的绘制

7.2.1 叠绕组的特点

叠绕组是合成节距 $y=y_k=\pm m$ 的一种绕组。在绕制这种绕组时，任何两个串联的元件都是后一个紧叠在前一个的上面，故称为叠绕组。当 $m=\pm 1$ 时，为单叠绕组；当 $m>1$ 时，为复叠绕组，复叠绕组用得最多的是双叠绕组，即 $m=\pm 2$。

单叠绕组是合成节距 $y=y_k=\pm 1$ 的一种绕组（见第 1 章图 1-8）。在绕制这种绕组时，任何两个串联的元件都是后一个紧叠在前一个的上面，故称为叠绕组。单叠绕组绕制时，每绕一个元件便在电枢表面移过一个虚槽。如果 $y=y_k=+1$，则绕组向右移动，称为“右行”绕组［图 1-8（a)］，如果 $y=y_k=-1$，则绕组向左移动，称为“左行”绕组（图 1-8b)。左行绕组每一元件接到换向片的两根端接线互相交叉，用铜较多，很少采用，故叠绕组常采用右行绕组。

7.2.2 叠绕组展开图绘制的方法步骤

绘制直流电机叠绕组展开图的方法步骤如下。

（1）节距计算

① 计算合成节距 y

对于右行单叠绕组　　$y=y_k=+1$

对于左行单叠绕组　　$y=y_k=-1$

对于右行复叠绕组　　$y=y_k=+m$

对于左行复叠绕组　　$y=y_k=-m$

式中 y_k 为换向器节距。

② 计算第一节距 y_1

$$y_1=\frac{Z_u}{2p}\mp\epsilon$$

式中，Z_u 为电枢铁芯的虚槽数；$2p$ 为直流电机的极数；ϵ 为使 y_1 凑成整数的一个小数。若 $y_1=\frac{Z_u}{2p}$，第一节距恰好等于一个极距，该绕组就称为整距绕组（也称全距绕组）；若 $y_1<\frac{Z_u}{2p}$，第一极距比极距小，该绕组就称为短距绕组。若 $y_1>\frac{Z_u}{2p}$，第一极距比极距大，该绕组就称为长距绕组。

③ 计算第二节距 y_2

$$y_2=y-y_1$$

（2）编制绕组连接表

绕组连接表用来表示电枢上所有元件边的串联次序。为此，必须先将槽和元件边编号。先把 Z_u 个槽沿电枢圆周编号（当 $u=1$ 时，虚槽＝实槽；当 $u>1$ 时，则应按虚槽进行编号），而元件边的号码就用槽的号码，上元件边直接用槽的号码，下元件边则在槽号上加撇。

（3）绘制绕组展开图和电路图

根据上述的绕组连接表可画出绕组展开图。它是假设把电枢从某一齿中间沿轴向切开而展开成一平面的绕组连接图。这时，上元件边用实线段表示，下元件边用虚线段表示。图中画的磁极是在绕组的上面，因此 N 极的磁力线方向指向纸面，S 极的磁力线从纸面穿出。

至于换向器和绕组元件之间的相对位置，为了获得常用的端接对称的绕组，应使每一元件所接的两个换向片的分界线恰好与元件的轴线（沿电枢半径方向而平分元件两边所跨角度的直线）重合。

换向片的编号与它所连接的上元件边的编号相同。

为进一步说明各元件的串联次序及其电势分布情况，可以用电路图来代替展开图。把每个元件用一位于元件轴线处的小线圈表示（每一个元件有两个引出线，沿顺时针方向先经过的引出线是该元件上元件边的引出线；沿顺时针方向后经过的引出线是该元件下元件边的引出线），并用箭头表示元件电动势方向。

（4）放置电刷

电刷放在换向器上的位置是根据空载时，正、负电刷之间获得最大电势这一原则来确定的。即电刷应与电动势为零的元件所连接的换向片相接触。

对端接对称的绕组，电刷必须放在主极轴线下的换向片上。

7.2.3 单叠绕组展开图的绘制

下面举一例来说明单叠绕组的绘制方法和特点。

【例 7-1】 已知一台直流电机极数 $2p=4$；电枢槽数 Z、电枢虚槽数 Z_u、元件数 S 与换向器片数 K 均等于 16。此时 $u=1$，$Z=Z_u=S=K=16$。要求绕制一个单叠右行整距绕组。

(1) 节距计算

因为是右行绕组，故 $$y=y_k=+1$$

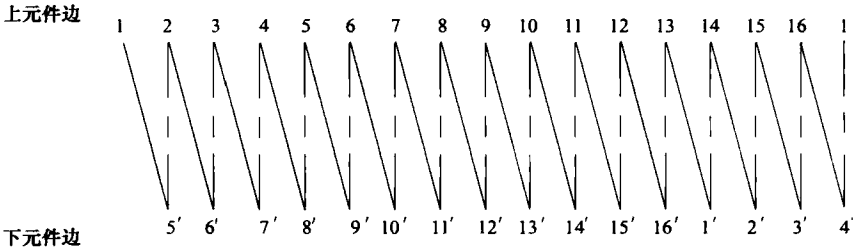
因为是整距绕组 $$y_1=\frac{Z_u}{2p}\mp\epsilon=\frac{16}{4}\mp0=4$$

$$y_2=y-y_1=1-4=-3$$

(2) 绕组连接表

绕组连接表用来表示电枢上所有元件边的串联次序。为此，必须先将槽和元件边编号。先把 16 个槽沿电枢圆周编号（本例 $u=1$，虚槽＝实槽；当 $u>1$ 时，则应按虚槽进行编号），而元件边的号码就用槽的号码，上元件边直接用槽的号码，下元件边则在槽号上加撇。这样第一槽的上层元件边编为 1，下层元件边编为 1′；第二槽的上层为 2，下层为 2′，余类推。至于元件的号码则编为与其上元件边相同的号码。

本例的绕组元件连接法为：第 1 元件的上元件边 1（嵌在槽 1 的上层）所接的下元件边号码为 $1+y_1=1+4=5'$（嵌在槽 5 的下层），而下元件边 5′应接至上元件边 $5+y_2=5-3=2$，它的下元件边又须接至 $2+4=6'$，如此类推下去可得下列的绕组连接表。



表中每根实线所连接的两个元件边构成一个元件。如 1－5′为第 1 元件，2－6′为第 2 元件……两元件之间的虚线则表示通过换向器上的一片换向片把两元件串联起来。从表可见，从第 1 元件出发，绕完 16 个元件后又回到第 1 元件而形成闭合回路。

(3) 绕组展开图和电路图

根据上述的绕组连接表可画出绕组展开图。展开图如图 7-1 所示，它是假设把电枢从某一齿中间沿轴向切开而展开成一平面的绕组连接图。这时，上元件边用实线段表示，下元件边用虚线段表示。图中画的磁极是在绕组的上面，因此 N 极的磁力线方向指向纸面，S 极的磁力线从纸面穿出。图中左上方的箭头表示绕组的旋转方向。

运用右手定则，可确定在图中所示瞬间各元件边内的感应电势方向，如图 7-1 中的箭头所示。

在图 7-1 中画出相邻两个主磁极之间的中心线，空载时此中心线通过的电枢表面

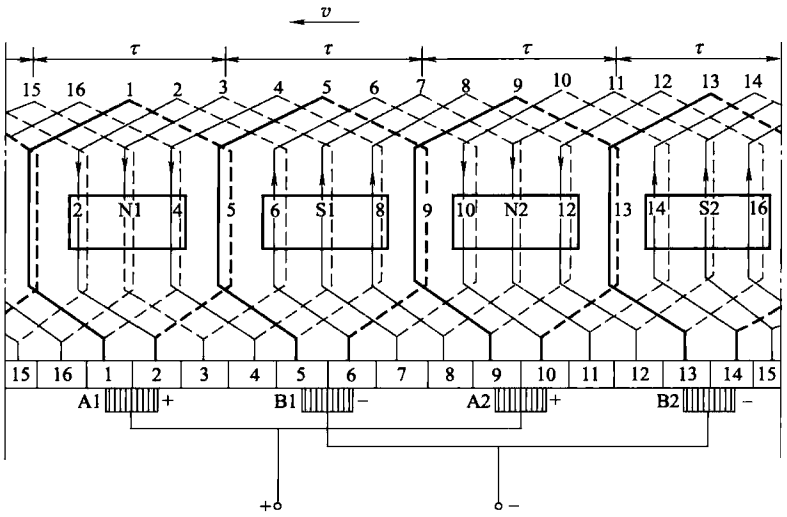


图 7-1　单叠绕组展开图

（$2p=4$，$Z_u=S=K=16$，$y=y_k=+1$）

处的主极磁通密度为零，故称为电枢上的几何中性线。显然，在几何中性线上的元件边的感应电势为零。因此，元件边 1、1′，5、5′，9、9′，13 和 13′皆无感应电势。

至于换向器和绕组元件之间的相对位置，为了获得常用的端接对称的绕组，应使每一元件所接的两个换向片的分界线恰好与元件的轴线（沿电枢半径方向而平分元件两边所跨角度的直线）重合。如图 7-1 所示，元件 1 所接的两个换向片 1 和 2 的分界线也恰在槽 3 的中心线上，因此该分界线与元件轴线重合。

换向片的编号与它所连接的上元件边的编号相同。这样，元件 1 的上元件边接到换向片 1，它的下元件边接到换向片 $1+y_k=1+1=2$，再经过元件 2 而接到换向片 $2+y_k=2+1=3$，如此继续依次连接，便可得到整个绕组的展开图。

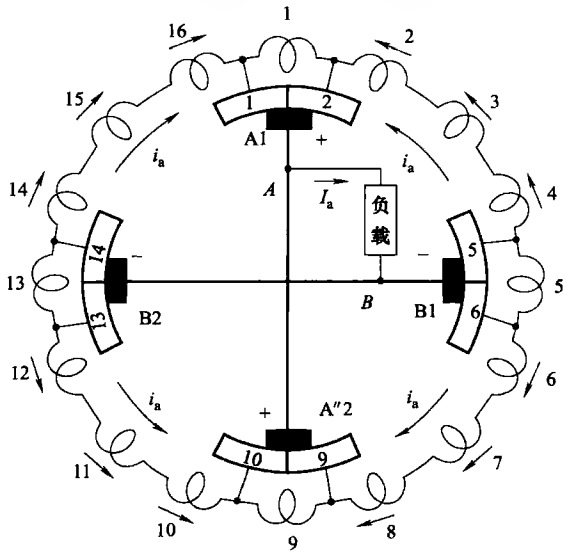


图 7-2　单叠绕组的电路图

为进一步说明各元件的串联次序及其电势分布情况，用图 7-2 所示的电路图来代替图 7-1 的展开图。把每个元件用一位于元件轴线处的小线圈表示（每一个元件有两个引出线，沿顺时针方向先经过的引出线是该元件上元件边的引出线；沿顺时针方向后经过的引出线是该元件下元件边的引出线），并用箭头表示元件电动势方向。从图

7-2 可清楚看到：整个电枢绕组 16 个元件构成一个闭合回路，其中四个元件 1、5、9、13 的电动势在图中所示瞬间皆为零，因为此时它们的元件边都在几何中性线上；这四个元件把整个回路分成四段，每段串联三个电势方向相同的元件；由于对称关系，这四段电路的电动势大小是相等的，但电动势方向两两相反；因此在整个闭合回路内，它们恰好互相抵消。这说明闭合回路的总电动势恰等于零，因此，当电刷没有与外电路接通时，电枢绕组内不会产生“环流”。

（4）电刷放置法

电刷放在换向器上的位置是根据空载时，正、负电刷之间获得最大电势这一原则来确定的。从图 7-1 和图 7-2 可见，为了获得最大电势，电刷应与电势为零的元件 1、5、9、13 所连接的换向片相接触。此时正、负电刷间每段电路所串联的三个元件的电势方向都相同，所以正、负电刷间的电势达到最大值。如果电刷偏离这一位置，例如从图中所示位置移过一片换向片，则每段电路所串联三元件的电势为：两个同方向而第三个为零，因此正、负电刷间的电动势减小了。同时由于此时被电刷短路的元件的电动势不为零，将产生短路电流，引起不良后果（如恶化换向、增加损耗，严重时则有烧坏元件的危险）。由此可见，电刷应与电动势为零的元件所连接的换向片相接触。

现在来分析元件电动势为零时的情况。如果元件是整距（$y_1=\tau$）的，则如图 7-1 所示，当元件两边位于几何中性线上时，元件电动势为零，此时元件轴线与主极轴线重合。如果元件是短距的（$y_1<\tau$），则如图 7-3（a）所示，当元件轴线与主极轴线重合时，元件电动势也为零。这时虽然两元件边不在几何中性线上因而都有感应电动势，但因它们左、右对称地位于同一极性的主极下，所以两元件边的感应电动势的大小和方向都相同，对元件回路来说就恰好互相抵消。对长距元件（$y_1>\tau$）也有同样情况。由此可见，无论整距、短距或长距元件，只要元件轴线与主极轴线重合，元件电动势便为零。对端接对称的元件，前已指出，元件轴线与元件所接两换向片的分界线重合，可见电动势为零的元件所接的两换向片的分界线必与主极轴线重合。故得出结论：对端接对称的绕组，电刷必须放在主极轴线下的换向片上。

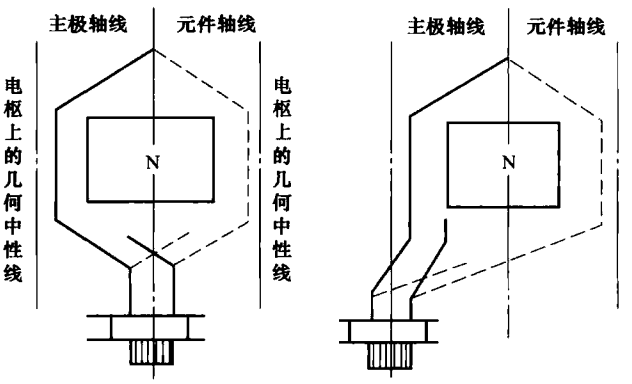


图 7-3 电刷放置法

如果元件采用不对称端接，以致当元件轴线与主极轴线重合时，元件所接两换向片的分界线不与主极轴线重合，而是偏离后者一个角度，则电刷位置应相应地移过同一角度，如图 7-3（b）所示。

综合以上分析，可概括如下：为了获得最大电动势，电刷应放在轴线与主极轴线重合的元件所接两换向片的分界线上，电刷的中心线与该分界线重合。

我们把上面所指的换向器上的分界线称为换向器上的几何中性线。其物理意义为：当电刷中心线与此中性线重合时，被电刷短路的元件的电动势必等于零或接近于零。这样，关于电刷放置法的结论便可归结为一句话：电刷应放在换向器上的几何中性线上。并常常把“换向器上的”五个字省略掉。

从上述可见，对应于一个主极，换向器上便有一根几何中性线，因而可放一组电刷。电机有 $2p$ 个主极，故沿换向器圆周应放 $2p$ 组电刷。对本例，$2p=4$，故应放四组电刷。实际电机中，一个主极下的元件数和相应的换向片数很多，通常电刷宽度等于换向片宽的 1.5～3.0 倍，前面画连接图时为了分析方便只画成一个换向片宽。

（5）绕组的并联支路数

从图 7-2 中各元件的电动势方向可以看出，电刷 A1 和 A2 是正极性，B1 和 B2 是负极性。把同极性的电刷 A1 和 A2 连接到 A 点，B1 和 B2 连接到 B 点，则从图可清楚地看到，从 B 点经电枢绕组到 A 点共有四条并联支路。因此，如果把电机作为发电机而在端点 A、B 间接上负载，则有直流电流 I_a 从 A 点流经负载到 B 点，再等分为四路，每路电流 $i_a=\frac{1}{4}I_a$，进入电枢，通过电枢内四条支路流到 A 点，如图 7-2 中所示。当电枢旋转时，各元件的位置随着移动，构成各支路的元件在交替更换，但从电刷外面看绕组时，仍然是一个有四条并联支路的电路。实际上，从展开图都可看出，任何瞬间，上元件边处在同一主磁极底下的元件具有相同的电动势方向，它们串联起来就形成一条支路。因此一个主磁极对应着一条支路，本例有四个主磁极，故有四条并联支路。

从上分析可见单叠绕组的特点是：绕组的并联支路数恒等于电机的主极数，即

$$2a=2p$$

或

$$a=p$$

式中 a——并联支路对数。

单叠绕组的并联支路数等于主磁极数，故增加电机的主磁极数便可增加电枢绕组的支路数，从而可使电枢通过较大电流。如果采用复叠绕组，则可在主磁极数不变的情况下使电枢绕组的支路数成倍增加。

7.2.4 复叠绕组展开图的绘制

在叠绕组中，如果相串联的两个元件的对应边不是一个虚槽，而是相差 m 个虚槽，相应地每一个元件两端所接的换向片不是相邻的换向片，而是相距 m 片换向片，即 $y=y_k=\pm m$。按照这样的规律串联下去，则从第一个元件绕起，每绕过电枢一周，只能将总元件的 $1/m$ 串联起来，因此必须经过 m 周，才能将所有元件绕完，这

种叠绕组称为复绕组。显然，复叠绕组是由 m 个单叠绕组复合而成的。

复叠绕组用得最多的是双叠绕组，即 $m=2$。双叠绕组的展开图如图 7-4 所示。

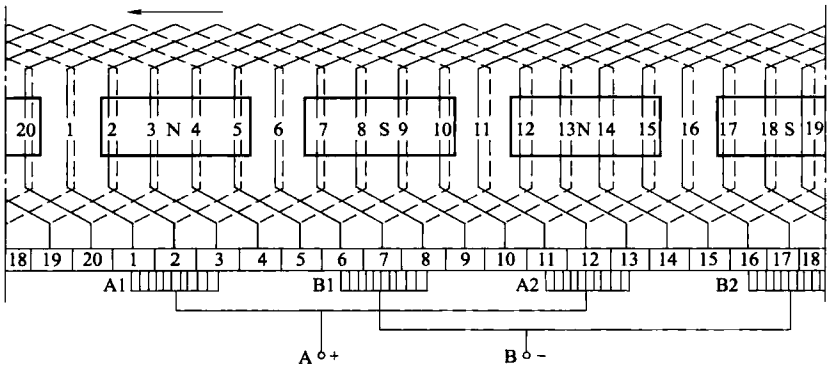


图 7-4 双闭路双叠绕组展开图

（$2p=4$，$Z_u=S=K=20$，$y=y_k=+2$）

复叠绕组的特点如下。

① 对于双叠绕组，当元件数为偶数时，可连成双闭路双叠绕组，即将偶数元件连成一个闭合回路，将奇数元件连成另一个闭合回路，通过电刷将两个回路并联起来，如图 7-4 所示。如果元件数为奇数时，则只能连成单闭路双叠绕组，即将所有的奇数元件连完后，接着连偶数元件，最后连成一个闭合回路。

② 对于端接对称的复叠绕组，仍应将电刷放置在主磁极轴线下的换向片上，并沿换向器圆周放置 $2p$ 组电刷。为保证其工作正常，m 叠绕组的电刷宽度应不小于 m 个换向片宽度。

③ 由于 m 叠绕组是由 m 个单叠绕组构成的，因此它的并联支路数 $2a$ 应等于单叠绕组并联支路数的 m 倍，即

$$2a=2mp$$

$$a=mp$$

④ 由于复叠绕组与单叠绕组相比，可以不用增加磁极数而得到更多的并联支路数。因此，复叠绕组常用在需要较多并联支路的大电流直流电机中。

7.3 波绕组展开图的绘制

7.3.1 波绕组的特点

波绕组是合成节距 $y=y_k=(K\pm1)/p=$ 整数的一种绕组。在绕制这种绕组时，

每个元件的两个出线端所接的两个换向片相隔较远，$y_k > y_1$，两元件串联形成第 1 章图 1-9 所示的波浪形，故称为波绕组。当 $m=1$ 时，为单波绕组；当 $m>1$ 时，为复波绕组。在单波绕组中，若合成节距 y 的表达式中取负号，称为左行绕组，如图 1-9（a）所示；若取正号，称为右行绕组，如图 1-9（b）所示。右行绕组的端接部分交叉，且比左行绕组的端接线略长，故波绕组常采用左行绕组。

单波绕组的连接规律是，从某一换向片出发，把相隔约为一对极距的同极性磁极下对应位置的所有元件串联起来，直到沿电枢和换向器绕过一周后，恰好回到出发换向片的相邻一片上；然后再从此换向片出发，继续再绕第二周、第三周…… 直把全部元件连完，最后回到最初出发的换向片，构成一个闭合回路为止。

单波绕组元件的第一节距 y_1 与叠绕组的一样，要求接近于极距 τ。但合成节距 $y=y_k$ 接近于 $2\tau\left(\text{即 } y_k \approx \frac{K}{p}\right)$而不能等于 2τ。因为当 $y=2\tau$ 时，由出发点开始，串联 p 个元件而绕电枢一周之后，就会回到出发点而闭合，以致绕组无法继续绕下去。如果绕组从某一换向片出发，沿电枢圆周和换向器绕一周后恰好回到原来出发的那个换向片相邻的一片上，则可由此再绕第二周、第三周……最后把全部元件串联完毕并与最初的出发点相接而构成一闭合绕组。故要求 y_k 值满足下列关系：

$$py_k = K \mp 1$$

或

$$y_k = y = \frac{K \mp 1}{p} = \text{整数}$$

波绕组的第二节距 y_2 为正值，同样满足 $y=y_1+y_2$ 的关系。

7.3.2 波绕组展开图绘制的方法步骤

绘制直流电机波绕组展开图的方法步骤如下。

（1）计算节距

① 计算合成节距 y

对于左行单波绕组

$$y = y_k = \frac{K-1}{p} = \frac{Z_u - 1}{p}$$

对于右行单波绕组

$$y = y_k = \frac{K+1}{p} = \frac{Z_u + 1}{p}$$

对于左行复波绕组

$$y = y_k = \frac{K-m}{p} = \frac{Z_u - m}{p}$$

对于右行复波绕组

$$y = y_k = \frac{K+m}{p} = \frac{Z_u + m}{p}$$

式中 y_k 为换向器节距；K 为换向片数。

② 计算第一节距 y_1

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} \mp \epsilon$$

式中，Z_u 为电枢铁芯的虚槽数；$2p$ 为直流电机的极数；ϵ 为使 y_1 凑成整数的一个小数。若 $y_1 = \frac{Z_u}{2p}$，第一节距恰好等于一个极距，该绕组就称为整距绕组（也称全

距绕组）；若 $y_1<\frac{Z_u}{2p}$，第一极距比极距小，该绕组就称为短距绕组。若 $y_1>\frac{Z_u}{2p}$，第一极距比极距大，该绕组就称为长距绕组。

③ 计算第二节距 y_2

$$y_2=y-y_1$$

（2）编制绕组连接表

绕组连接表用来表示电枢上所有元件边的串联次序。为此，必须先将槽和元件边编号。先把 Z_u 个槽沿电枢圆周编号（当 $u=1$ 时，虚槽＝实槽；当 $u>1$ 时，则应按虚槽进行编号），而元件边的号码就用槽的号码，上元件边直接用槽的号码，下元件边则在槽号上加撇。

（3）绘制绕组展开图和电路图

根据上述的绕组连接表可画出绕组展开图。它是假设把电枢从某一齿中间沿轴向切开而展开成一平面的绕组连接图。这时，上元件边用实线段表示，下元件边用虚线段表示。图中画的磁极是在绕组的上面，因此 N 极的磁力线方向指向纸面，S 极的磁力线从纸面穿出。

至于换向器和绕组元件之间的相对位置，为了获得常用的端接对称的绕组，应使每一元件所接的两个换向片的分界线恰好与元件的轴线（沿电枢半径方向而平分元件两边所跨角度的直线）重合。

换向片的编号与它所连接的上元件边的编号相同。

为进一步说明各元件的串联次序及其电势分布情况，可以用电路图来代替展开图。把每个元件用一位于元件轴线处的小线圈表示（每一个元件有两个引出线，沿顺时针方向先经过的引出线是该元件上元件边的引出线；沿顺时针方向后经过的引出线是该元件下元件边的引出线），并用箭头表示元件电动势方向。

（4）放置电刷

电刷放在换向器上的位置是根据空载时，正、负电刷之间获得最大电势这一原则来确定的。即电刷应与电动势为零的元件所连接的换向片相接触。

对端接对称的绕组，电刷必须放在主极轴线下的换向片上。

7.3.3 单波绕组展开图的绘制

现举一例来说明单波绕组的绕法、支路电动势和支路数等问题。

【例 7-2】 已知一台直流电机极数 $2p=4$；电枢槽数 Z、电枢虚槽数 Z_u、元件数 S 与换向器片数 K 槽数均等于 15。此时 $u=1$；$Z=Z_u=S=K=15$。要求绕制一个左行短距单波绕组。

（1）节距计算

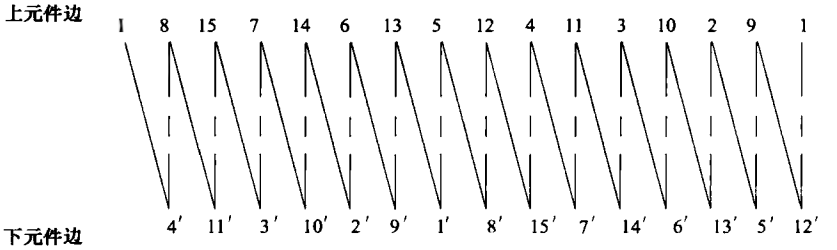
因为是左行绕组，故 $$y=y_k=\frac{K-1}{p}=\frac{15-1}{2}=7$$

因为是短距绕组，故 $$y_1=\frac{Z_u}{2p}\mp\varepsilon=\frac{15}{4}-\frac{3}{4}=3$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 3 = 4$$

（2）绕组连接表

根据上列节距可画出绕组的连接表。槽 1 的上元件边 1 接到槽 $1 + y_1 = 1 + 3 = 4$ 的下元件边 4′构成第一个元件，再由 4′接到槽 $4 + y_2 = 4 + 4 = 8$ 的上元件边 8，由 8 接到槽 $8 + y_1 = 8 + 3 = 11$ 的下元件边 11′而构成第二个元件，如此继续接下去便得所有 30 个元件边的串联次序如下表。



从上表可见全部 15 个元件按下列次序串联起来，构成一个闭合绕组：

1－8－15－7－14－6－13－5－12－4－11－3－10－2－9－1

（3）绕组展开图和电路图

根据上述的绕组连接表即可绘出绕组展开图，如图 7-5 所示。通常画波绕组的展开图时也要使端接对称。对波绕组来说，所谓端接对称是指：每一个元件所接的两个换向片对称地位于该元件轴线的左右两边，亦即元件所接两换向片之间的中心线与元件轴线重合。在端接对称的波绕组中，电刷也放在主极轴线下的换向片上。元件在换向器上的串联次序是：元件 1 的上元件边接到换向片 1，它的下元件边接到换向片 $1 + y_k = 1 + 7 = 8$，再串联元件 8 而接到换向片 $8 + y_k = 8 + 7 = 15$，如此继续串联下去，可把 15 个元件串联完毕而回到换向片 1，构成闭合回路。

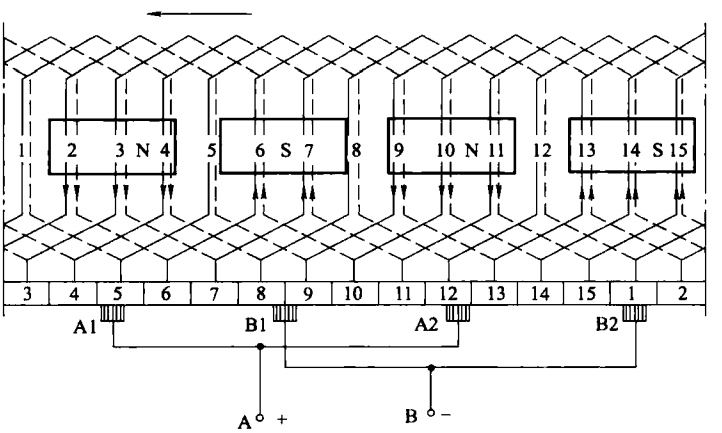


图 7-5　单波绕组展开图

（$2p=4$；$S=K=Z=15$）

根据右手定则可确定，各元件的电动势方向如图 7-5 中箭头所示。在图中所示瞬间，由于元件 1、5、9 的元件边位于几何中性线附近，这三个元件的电动势为零或接

近于零。

把图 7-5 的展开图画成图 7-6 所示的电路图，可更清楚地看出所有元件的串联次序、电动势分布和电刷的放置情况。

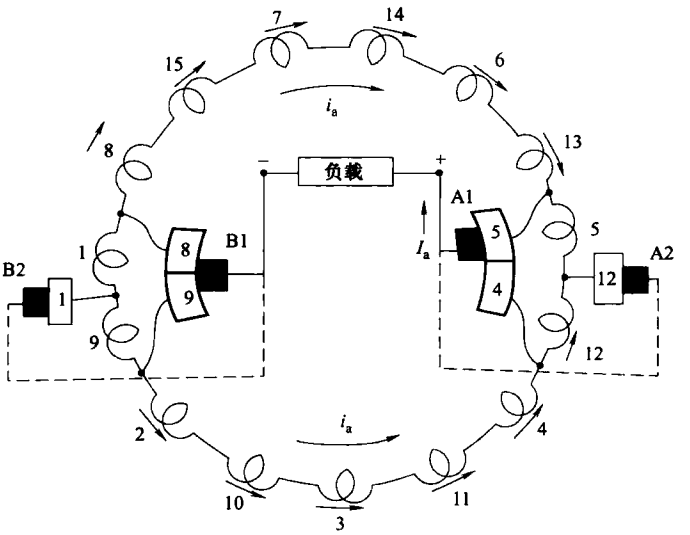


图 7-6 单波绕组的电路图

(4) 绕组的并联支路数

从图 7-6 可见，连接在一起的正电刷 A1 和 A2 把电动势为零的元件 5 短路；连接在一起的负电刷 B1 和 B2 则把电动势接近为零的元件 1 和 9 短路。从负电刷 B1 分两路出发，一路是从换向片 8 经元件 8、15、7、14、6、13 到换向片 5，再从换向片 5 到与它接触的正电刷 A1；沿此路线各元件的电动势方向都是顺着绕行方向，因而互相叠加。另一路线从换向片 9 经元件 2、10、3、11、4、12 至换向片 12，再到与它接触的正电刷 A2；沿此路线各元件的电动势方向也是顺着绕行方向而互相叠加。由此可见从负电刷经电枢绕组到正电刷只有两条并联支路。把图 7-6 和图 7-5 结合在一起来看，可见一条支路串联的六个元件 8、15、7、14、6、13 的上元件边都是位于极性为 S 的主磁极底下，而另一条支路串联的六个元件 2、10、3、11、4、12 的上元件边则都是位于极性为 N 的主磁极底下。加上三个被电刷短路的元件 1、9、5 就是绕组的全部元件。因此整个绕组只有两条并联支路，而与主磁极数目无关。当电枢旋转时，各元件的位置随时间变化，构成支路的元件则交替更换，但从电刷外面看绕组时仍然是一个有两条并联支路的电路。

从上分析可见，单波绕组的特点是并联支路数目恒等于 2 而与主磁极数目无关，即

$$2a=2$$

或

$$a=1$$

这是单波绕组与单叠绕组的显著差别。造成这种差别的根本原因是它们的连接规律不同。在单叠绕组中，元件的串联次序是先串联所有上元件边在同一个 N 极下面的元

件，形成一条支路；再串联所有上元件边在相邻的一个S极下面的元件形成另一条支路；这样继续交替地串联全部元件而形成一闭合绕组。因此单叠绕组每增加一对主磁极就增加一对支路。但波绕组却不然，它是先把全部上元件边在电机所有N极下面的元件都串联起来，形成一条支路；再把全部上元件边在所有S极下面的元件都串联起来，形成另一条支路；再由这两部分串联成为闭合回路。因此整个绕组只有一对支路，主磁极数的增减与支路数无关。

（5）电刷位置和电刷组数

分析叠绕组时得出结论“电刷应放在换向器上的几何中性线上”也适用于波绕组。为此，可把“换向器上的几何中性线”的意义扩大为：当元件轴线与主磁极轴线重合时，该元件所接两换向片之间的中心线便是换向器上的几何中性线。其物理意义仍是：当电刷中心线与此几何中性线重合时，被电刷短路的元件的电动势等于零或接近于零。如图7-5所示瞬间，元件5的轴线与主磁极轴线重合，因此该元件所接两换向片5和12的中心线（即换向片8、9的分界线）是换向器上的几何中性线，故在这里放置电刷B1，并使B1的中心线与此中性线重合。从图可见这时元件9和元件1串联后被电刷B1短路，因为此时元件1和9对称地位于S极轴线的左右两边，所以这两个元件的电动势大小相等而方向相反，串联起来便互相抵消，故合成电动势为零，随之被电刷B1短路时不会产生短路电流。实际上，此时元件9和1的元件边都位于电枢上的几何中性线附近，元件电动势本身就已接近于零，故串联之后即使不能完全抵消，其合成电动势也必然接近于零。对端接对称的绕组，无论叠绕组或波绕组，由于换向器上的几何中性线与主极轴线重合，所以电刷应放在主极轴线下的换向片上。

从以上分析可见，无论叠绕组或波绕组，每个主磁极都可在换向器上找到一根几何中性线，因此换向器上的几何中性线的数目等于主磁极数$2p$，随之可在换向器上放置$2p$组电刷。但对单波绕组，从图7-6可见，由于只有两条并联支路，理论上只需放置两组电刷就可以了。例如把图7-6中的电刷A2和B2取消，只留电刷A1和B1，对两支路电动势的大小并无影响。但实际上除特殊情况外，一般仍采用$2p$组电刷（即全额电刷）。这是因为电刷数目增加后，每组电刷上通过的电流可以减小，在一定的电刷允许电流密度下，可减小每组电刷与换向器的接触面积，随之可缩短换向器的长度，节省用铜量。

单波绕组的特点是只有两条并联支路，因此，在一定的绕组元件数下，每支路串联的元件数较多，因而可得较高电压。增加主磁极数不能增加波绕组的支路数。若要增加支路数，可采用复波绕组。

7.3.4 复波绕组展开图的绘制

在波绕组中，如果沿电枢绕一周，将同极性下的p个元件串联后，不是返回到与起始换向片相邻的换向片上，而是回到与起始换向片相隔2片或m片上，而后继续前绕，则所得绕组相当于2个或m个单波绕组复合在一起，故称为复波绕组。双波绕组的展开图如图7-7所示。

复波绕组的特点如下。

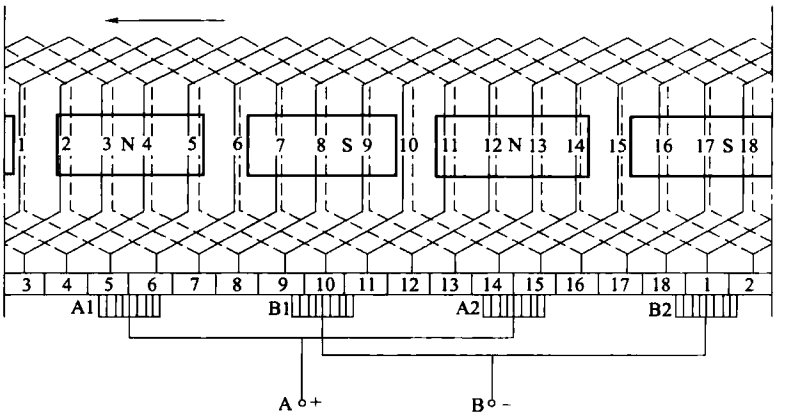


图 7-7 双波绕组展开图

$$\left(2p=4,\ Z_u=S=K=18,\ y=y_k=\frac{K-2}{p}\right)$$

① 和双叠绕组一样，构成双波绕组的两个单波绕组可以彼此互相串联而构成一个闭合回路，也可以没有直接联系而构成两个独立的闭合回路，前者称为单闭路双波绕组，后者称为双闭路双波绕组。一般来说，当合成节距 y 或换向器节距 y_k 与换向片数 K 互为质数时，得单闭路双波绕组；而当 y_k 与 K 有公约数 2 时，则得双闭路双波绕组。

② 在端接对称的复波绕组里，电刷也应放置在主磁极轴线下面的换向片上，并且沿换向器圆周也放置 $2p$ 组电刷。为了将所包含的 m 个单波绕组并联起来，和 m 叠绕组一样，实用上 m 波绕组的电刷宽度常取不小于 m 个换向片的宽度。

③ 由于复波绕组是由 m 个单波绕组构成，并借电刷并联在一起，因此它的并联支路数为单波绕组并联支路数的 m 倍，即

$$2a=2m$$

或

$$a=m$$

④ 复波绕组常用于中型较高电压的直流电机中。

换向极与换向极绕组

装置换向极是改善换向最有效的方法。换向极安装在两个主磁极之间的几何中性线上，如图 7-8 所示。在换向极的极身上套有换向绕组，该绕组匝数不多，但导线截面积较大，换向极绕组与电枢绕组串联。

换向极的作用是当电机有负载时，电枢电流流过换向极绕组产生磁动势，其方向与交轴电枢磁动势 F_{aq} 相反，其大小则应除抵消换向极下交轴电枢反应磁动势外，还要在换向区内建立一个适当的外磁场，即换向磁场。通过换向磁场，使换向元件产生

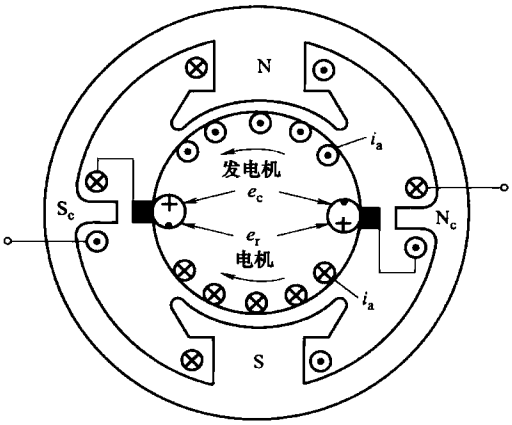


图 7-8　装置换向极改善换向

附加电动势，以抵消电抗电动势，只要设计正确，就可使换向元件的总电动势接近零值，从而改善电机的换向。

7.5 补偿绕组

在直流电机中，除电磁性火花外，有时还因某些换向片的片间电压过高而产生火花，称为电位差火花。在最不利的情况下，电磁性火花与电位差火花连成一片，以至于发展到换向器上出现一圈火花，即所谓环火。克服环火最有效的方法是采用补偿绕组。

补偿绕组嵌装在主磁极的极靴上，如图 7-9 所示。补偿绕组与电枢绕组串联，其电流方向与所对应的主磁极下电枢绕组的电流方向相反，从而补偿交轴电枢反应。

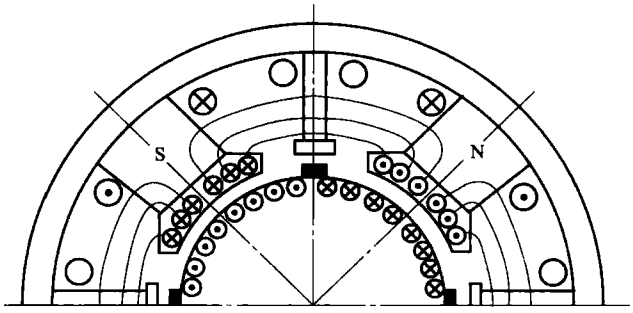


图 7-9　补偿绕组示意图

大、中容量的直流电机一般电枢电流较大，电枢反应将使气隙磁场严重畸变，从而形成换向片间的电位差火花而导致环火。如果在主磁极的极靴槽中安放补偿绕组，并和电枢绕组串联，令补偿绕组产生的磁动势与电枢绕组磁动势方向相反，从而消除

交轴电枢磁动势的影响，使气隙磁场在负载时不产生畸变，可消除电位差火花，防止环火。装有补偿绕组的电机，其换向极所需磁动势可相应地减少。由于补偿绕组用铜量较多，结构复杂，因此只在大、中容量的直流电机中才采用。

7.6 直流电机常用电枢绕组展开图实例

【例 7-3】 4 极 34 槽电枢叠绕组展开图（见图 7-10）

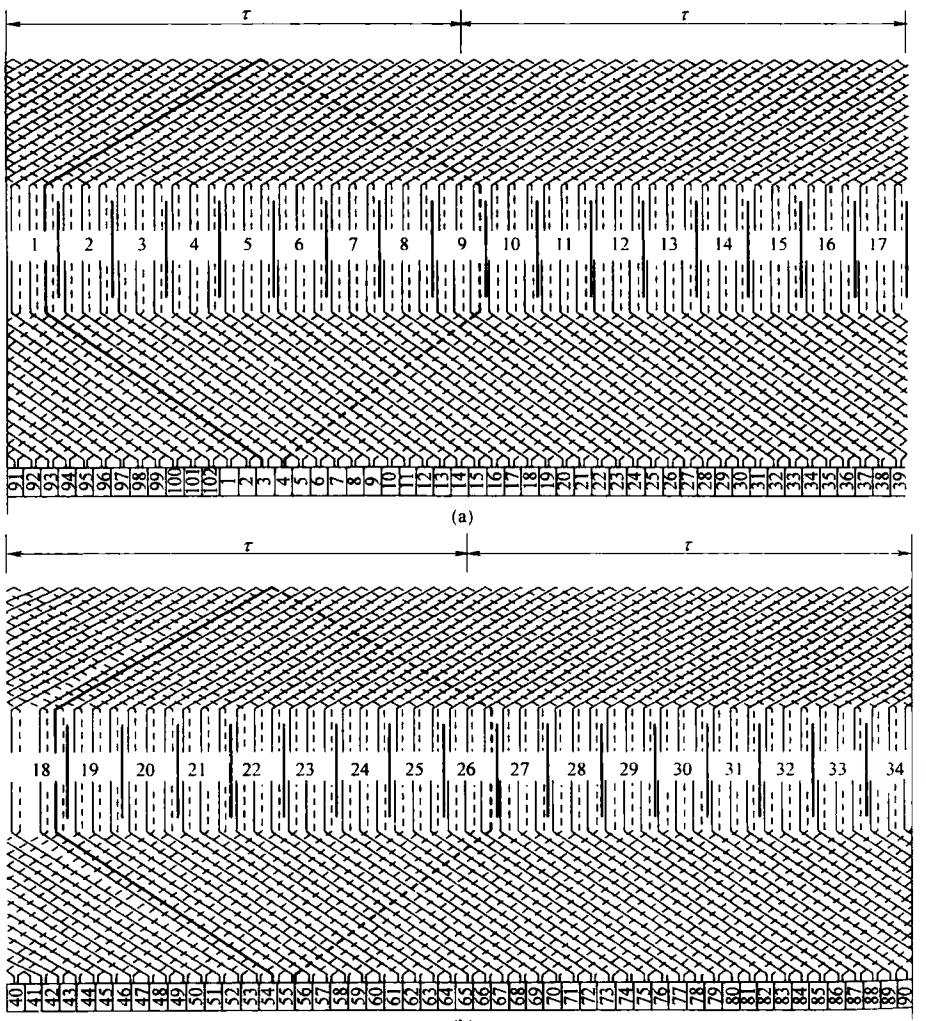
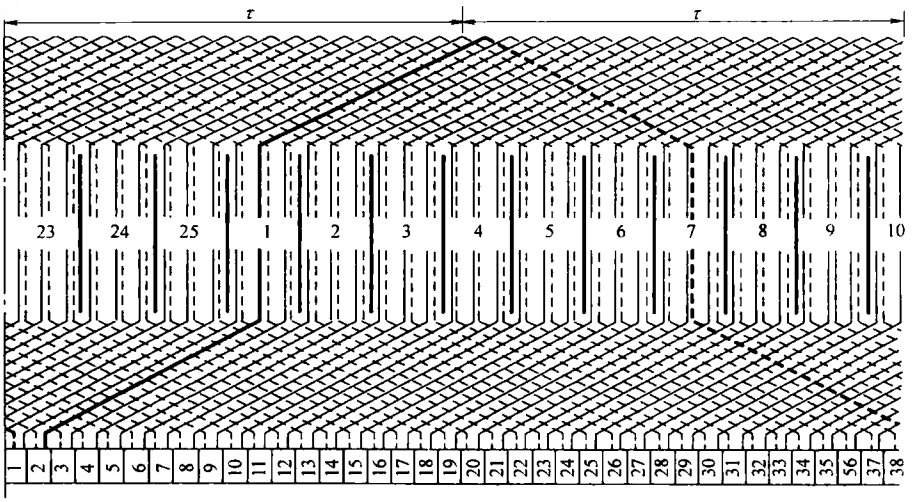


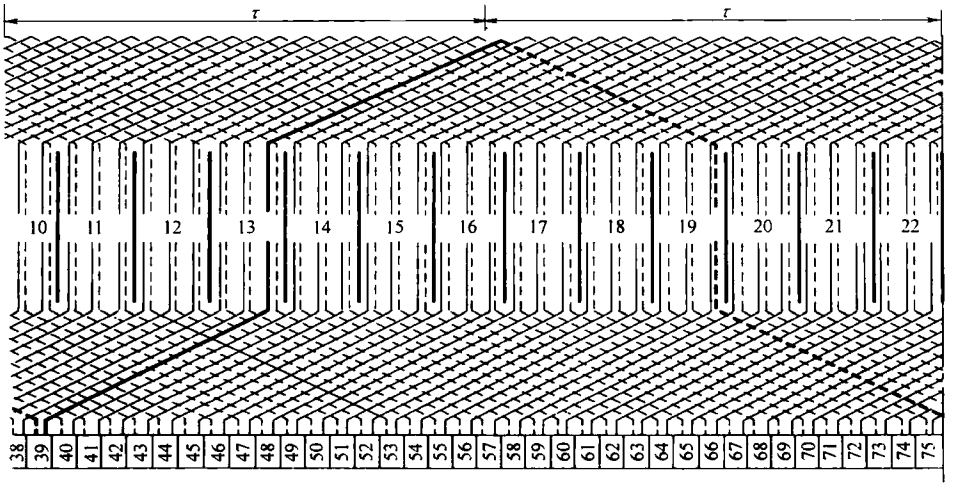
图 7-10 4 极 34 槽电枢叠绕组展开图

（$y=1-9$，$y_k=+1$，$K=102$，$u=3$）

【例 7-4】 4 极 25 槽电枢单波绕组展开图（见图 7-11）



(a)



(b)

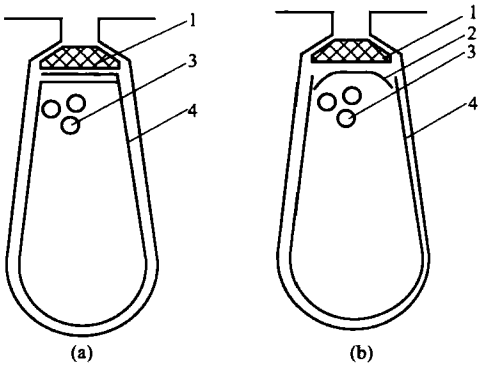
图 7-11　4 极 25 槽电枢单波绕组展开图

（$y=1-7$，$y_k=1$　38，$K=75$，$u=3$）

电机绕组绝缘结构及绝缘规范

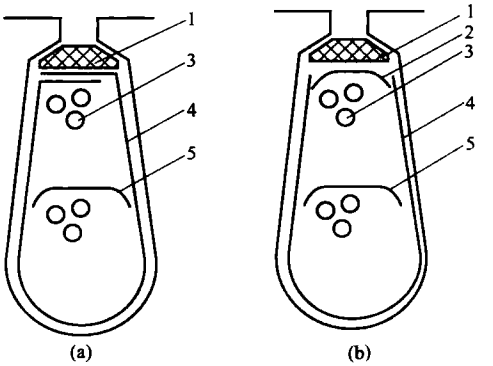
1. 交流电机绕组的绝缘结构及绝缘规范

在异步电机定子绕组中，单层绕组的绝缘结构如附图 1 所示，双层绕组的绝缘结构如附图 2 所示。



附图 1　单层绕组的绝缘结构

1—槽楔；2—盖槽绝缘；3—绕组；4—槽绝缘



附图 2　双层绕组的绝缘结构

1　槽楔；2　盖槽绝缘；3　绕组；4　槽绝缘；5　层间绝缘

(1) J2、JO2 系列电机的绝缘规范

① 定子线圈。定子线圈由 QQ 型或 QZ 型高强度漆包线绕制而成。

② 槽部绝缘。槽部绝缘（简称槽绝缘）采用槽绝缘不出槽口，在槽楔下加 U 形垫条（即盖槽绝缘）的方案。这个方案比槽绝缘折弯交叠的方案可减少槽绝缘高度方向的厚度，提高槽的利用率。不同机座号的电机其槽绝缘规范见附表 1。

附表 1　J2、JO2 系列电机定子绕组槽绝缘规范

机座号	槽绝缘形式	总厚度/mm
1～2	0.22mm 聚酯薄膜复合绝缘纸	0.22
3～5	0.27mm 聚酯薄膜复合绝缘纸	0.27
6～9	0.15mm 三聚氰胺醇酸黄玻璃漆布与 0.27 mm 聚酯薄膜复合绝缘纸	0.42

③ 相间绝缘。绕组端部各相之间采用一层与槽绝缘相同规格的聚酯薄膜复合绝缘纸。其形状要与线圈端部的形状相同，但尺寸要比线圈端部大。

④ 层间绝缘。当采用双层绕组时，同一个槽内上、下两层之间垫入一层 0.27mm 的聚酯薄膜复合绝缘纸，其长度约等于线圈的直线部分的长度。

⑤ 槽楔。槽楔采用厚度为 2.5mm 或 4mm 的梯形竹楔，经变压器油煮煎处理而成。槽楔下衬垫材料规格与槽绝缘相同。

⑥ 引接线。引接线系采用电缆，其连接部位在端部绑扎时一起扎牢。

⑦ 端部绑扎。1～5 号机座的电机定子绕组端部用经浸 1032 漆处理的无碱玻璃丝带或玻璃丝套管疏绕扎紧；6～9 号机座的电机定子绕组端部必须绑扎牢。

⑧ 绝缘漆浸烘处理。定子绕组嵌线和接线后，浸 1032 漆两次。

（2）Y 系列电机的绝缘规范

① 定子线圈。定子线圈采用 QZ-2 型高强度聚酯漆包圆铜线绕制而成。

② 槽绝缘。槽绝缘采用复合绝缘材料（DMDM 或 DMD），不同中心高的电机其槽绝缘规范见附表 2。

附表 2　Y 系列电机定子绕组槽绝缘规范　　mm

外壳防护等级	中心高	槽绝缘形式及总厚度				槽绝缘均匀伸出铁芯两端长度
		DMDM	DMD+M	DMD[1]	DMD+DMD	
IP44	80～112	0.25	0.25 (0.20+0.05)	0.25		6～7
	132～160	0.30	0.30 (0.25+0.05)			7～10
	180～280	0.35	0.35 (0.30+0.05)			12～15
	315	0.50			0.50 (0.20+0.30)	20
IP23	160～225	0.35	0.35 (0.30+0.05)			11～12
	250～280		0.40 (0.35+0.05)		0.40 (0.20+0.20)	12～15

① 0.25mmDMD 其中间层薄膜厚度为 0.07mm；D—聚酯纤维无纺布；M—6020 聚酯薄膜。

③ 相间绝缘。绕组端部各相之间垫入与槽绝缘相同的复合绝缘材料（DMDM 或 DMD），其形状要与线圈端部的形状相同，但尺寸要比线圈端部大。

④ 层间绝缘。当采用双层绕组时，同一个槽内上、下两层线圈之间垫入与槽绝缘相同的复合绝缘材料（DMDM 或 DMD）作为层间绝缘，其长度约等于线圈的直线部分的长度。

⑤ 槽楔。槽楔采用冲压成型的 MDB（M、D 和玻璃布 B 的复合物）复合槽楔或新型的引拔槽楔或 3240 环氧酚醛层压玻璃布板。中心高为 80～280mm 的电机用厚度为 0.5～1.0mm 的成型槽楔或引拔槽楔，或厚度为 2mm 的 3240 板；中心高为 315mm 的电机用厚度为 3mm 的 3240 板或引拔槽楔。冲压或引拔成型的槽楔，其长度与相应的槽绝缘相同；3240 板槽楔的长度比相应的槽绝缘短 4～6mm。槽楔下垫入长度与槽绝缘相同的盖槽绝缘。

⑥ 引接线。引接线采用 JXN（JBQ）型铜芯橡皮绝缘丁腈护套电机绕组引接电缆，用厚 0.15mm 的醇酸玻璃漆布带或聚酯薄膜带将电缆和线圈连接处半叠包一层，外部再套醇酸玻璃漆管一层。如无大规格醇酸玻璃漆管，线圈连接处可用醇酸玻璃漆布带半叠包两层，外部再用 0.1mm 无碱玻璃纤维带半叠包一层。

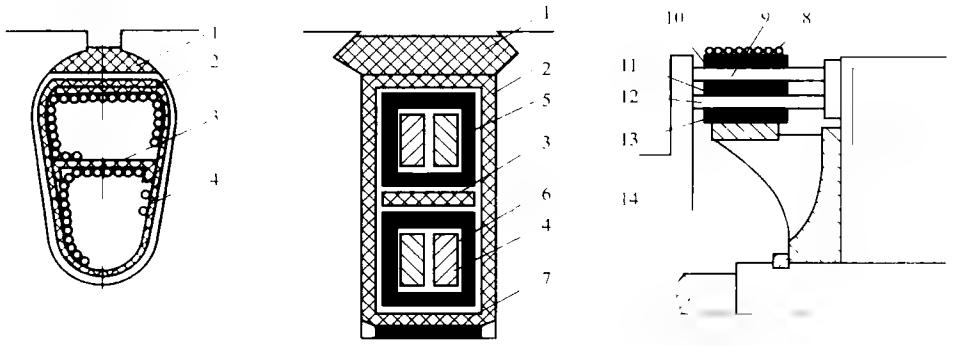
⑦ 端部绑扎。中心高为 80～132mm 的电机，定子绕组端部每两槽绑扎一道；中

心高为 160～315mm 的电机，定子绕组端部每一槽绑扎一道。对中心高为 180mm 的二极及中心高为 200～315mm 的二、四极电机，定子绕组的鼻端用无碱玻璃纤维带半叠包一层。中心高为 315mm 的二极电机，定子绕组端部外端用无纬玻璃带绑扎一层。在有引接线的一端，应将电缆和接头处同时绑扎牢，必要时应在此端增加绑扎层数（或绑扎道数）。绑扎用材料为电绝缘用的聚酯纤维编织带（或套管），或者用无碱玻璃纤维带（或套管）。

⑧ 绝缘漆浸烘处理。浸渍漆为 1032 漆时，采用二次沉浸处理工艺。采用 EIU、319-2 等环氧聚酯类无溶剂漆时，沉浸一次。

2. 直流电机绕组的绝缘结构及绝缘规范

直流电机电枢绕组的绝缘结构（500V 以下电压等级、耐热等级为 B 级）如附图 3 所示。



(a)梨形槽散嵌线圈的绝缘结构　(b)矩形槽成型线圈的绝缘结构　(c)绕组端部的绝缘结构

附图 3　直流电枢绕组的绝缘结构

1—槽楔；2—槽绝缘；3　层间绝缘；4　导线；5　导线绝缘；6—匝间绝缘；7　槽底绝缘；8—钢丝；9—上层导线；10—钢丝下绝缘；11　端部层间绝缘；12　下层导线；13　支架绝缘；14　升高片

附图 3（a）为梨形槽散嵌线圈的绝缘结构，其所用材料见附表 3。附图 3（b）为矩形槽成型线圈的绝缘结构，其所用材料见附表 4。绕组端部绝缘结构如附图 3（c）所示。

附表 3　梨形槽散嵌线圈的绝缘材料

项号	绝缘等级 / 材料名称	B 级	F 级	H 级
1	槽楔或绑环	环氧酚醛玻璃布板 高强度无纬玻璃丝带	环氧酚醛玻璃布板 高强度无纬玻璃丝带	硅有机玻璃布板 聚芳烷基醚-酚树脂无纬玻璃丝带

续表

项号	材料名称 \ 绝缘等级	B级	F级	H级
2	槽绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合材料	聚砜纤维纸-聚酯薄膜-聚砜纤维纸复合材料	聚砜纤维纸-聚酰亚胺薄膜-聚砜纤维纸复合材料
3	层间绝缘	聚酯纤维纸聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合材料	聚砜纤维纸聚酯薄膜-聚砜纤维纸复合材料	聚砜纤维纸-聚酰亚胺薄膜-聚砜纤维纸复合材料
4	导线	高强度聚酯漆包线	聚酯亚胺漆包线	聚酰亚胺漆包线 聚酰胺酰亚胺漆包线

附表 4　矩形槽成型线圈的绝缘材料

项号		材料名称 \ 绝缘等级	B级	F级	H级
槽部	1	槽楔或绑环	环氧酚醛玻璃布板 高强度无纬玻璃丝带	环氧酚醛玻璃布板 高强度无纬玻璃丝带	硅有机玻璃布板 聚芳烷基醚-酚树脂无纬玻璃丝带
	2	槽绝缘	聚酯薄膜玻璃漆布	聚酰亚胺薄膜玻璃漆布	聚砜酰胺纤维纸-聚酰亚胺薄膜复合材料
	3	槽底垫条	环氧酚醛玻璃布板	环氧酚醛玻璃布板	硅有机玻璃布板
线圈	4	包护带	无碱玻璃丝带	浸 6301 漆无碱玻璃丝带	浸硅有机漆无碱玻璃丝带
	5	对地绝缘	桐油酸酐环氧粉云母带，醇酸玻璃柔软云母板	HF 薄膜 F 级柔软云母板	硅有机漆粉云母带聚酰亚胺薄膜
	6	匝间绝缘	高强度聚酯漆或醇酸树脂双玻璃丝或醇酸纸云母带	聚酯亚胺漆和单玻璃丝	HF 薄膜-薄硅有机漆双玻璃丝

3. 变频调速异步电机加强绝缘的措施

（1）选用合适的电磁线

电磁线（漆包圆线）采用三层漆膜复合导线，其底漆为聚酯亚胺，面漆为聚酰胺酰亚胺，中间层为含抗高频脉冲性能的纳米材料的有机漆膜。也可采用使用特殊漆膜涂层的双层复合导线或使用变频电机专用耐电晕漆包圆铜线。

（2）加强槽绝缘和相间绝缘

槽绝缘材料目前使用的 NHN、NMN 或 F 级 DMD 等由几种混合物制成。这类材料由于具有有机性不能耐电晕。解决办法是加入一种含云母的新型槽绝缘，云母的

加入使其耐电晕性比只以有机材料为基础的材料有所提高。通过使用两侧贴有聚酯薄膜的 160g/m² 云母纸，实现短期和长期耐电晕。聚酯薄膜也给这种材料提供足够的强度，以利于绕组的嵌线和整形处理。

相间绝缘宜优先采用表面贴有聚酯绒布的 NHN、NMN 或 F 级 DMD 和薄膜组成的组合绝缘。因为通常所用的是浸渍处理后全部为 F 级的材料，因此两层聚酯绒布间夹一层聚酯薄膜的绝缘是一种良好的材料。同其他材料相比，它能更好地吸收树脂，使固化期间的漆或树脂不易流出，可以实现与导线更好地黏结。

(3) 浸渍漆和浸渍工艺的选用

目前 F、H 级浸渍漆主要分为有溶剂漆、苯乙烯型无溶剂浸渍树脂和低挥发份聚酯型无溶剂浸渍树脂。有溶剂漆含有的溶剂在烘焙过程中大量挥发，在绕组内易形成气隙，不适合变频电机使用。苯乙烯型无溶剂浸渍树脂含有的苯乙烯单体在高温固化时，也易挥发，同样难以形成无气隙绝缘。低挥发份聚酯型无溶剂浸渍树脂固化速度快，固化过程中挥发物小于 5%，采用适当的浸渍工艺，基本上可以形成无气隙绝缘。

由于交流变频电机要求获得无气隙绝缘，而且电机品种规格较多，大小差异甚大，故不宜采用沉浸、滴浸或滚浸工艺。采用真空压力浸渍工艺能使浸渍树脂充分渗透到电机绕组间的空隙，为了防止浸渍树脂在烘焙、固化过程中流失，宜采用旋转烘焙固化工艺，这样可以得到较理想的无气隙绝缘。

(4) 合理的绕线、嵌线等加工工艺

绕组的制作质量，对于变频电机绝缘结构整体绝缘性能有较大的影响。因此，对于绕线、嵌线、绑扎等加工工艺必须严加管理，特别是在绕线、嵌线过程中应注意防止损伤导线，嵌线过程中应保证槽绝缘、相绝缘放置到位。必须对嵌线后的白坯严格按照匝间耐冲击电压试验及对地耐电压试验标准进行试验，以确保其电气绝缘性能的可靠。

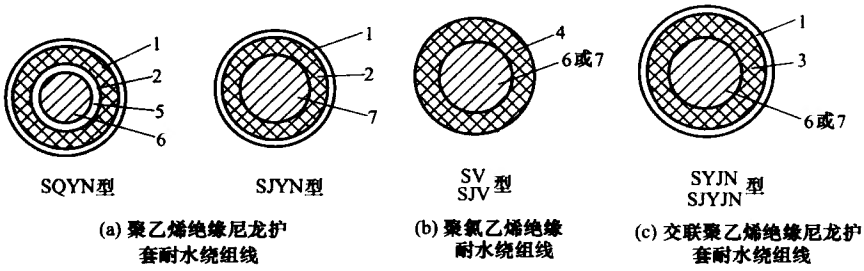
(5) 提高绝缘结构的机械强度

由于电磁激振力及机械振动等影响，变频电机绝缘结构应尽可能提高其整体性及机械强度。为此，在选用绝缘材料时，应选用容易被浸透的材料，线圈端部应加强绑扎、固定，确保端部成为一个整体。采用真空压力浸渍及旋转烘焙工艺，也有利于提高绝缘结构的机械强度。为防止高频电磁振动引起的整个绝缘结构的松散，建议电机的定子端部每槽用绑扎带绑扎，绑扎带可以用 BE 聚酯纤维绑扎带，也可以用 R 型柔软夹纱聚酯绑扎带。

4. 井用潜水电机定子绕组的绝缘结构

(1) 井用充水式潜水电机定子绕组的耐水绝缘结构

井用充水式潜水电机定子绕组一般采用 SQYN 型漆包铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线、SJYN 型绞合铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线、SV 型实心铜导体聚氯乙烯绝缘耐水绕组线、SJV 型绞合铜导体聚氯乙烯绝缘耐水绕组线、SYJN 型实心铜导体交联聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线、SJYJN 型绞合铜导体交联聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线或类似性能的其他型号耐水绝缘导线制成。耐水绝缘导线的结构如附图 4 所示。



附图 4　耐水绝缘导线结构

1—尼龙；2—聚乙烯；3—交联聚乙烯；4—聚氯乙烯；5—漆层；6—铜导体；7—绞合铜导体

为了提高可靠性，减少定子绕组的连接头，简化定子绕组的制作工艺，充水式潜水电机的定子绕组常采用整根耐水绝缘导线一相连续绕线来制造多组线圈或直接在定子铁芯上一相线圈连续穿线的制作工艺。

井用充水式潜水电机定子绕组的星形连接点、耐水绝缘导线与引出电缆的连接接头以及引出电缆与动力电缆的连接接头的密封工艺为：一般采用自黏性胶带作主密封和主绝缘层，外加机械保护层。要求接头密封包扎紧密、密封可靠、耐水绝缘性能良好。

（2）井用充油式潜水电机定子绕组的耐油绝缘结构

井用充油式潜水电机定子绕组一般采用加强绝缘的 QYS 型环氧改性聚酰胺酰亚胺和聚酯复合的耐油、水漆包线或耐油性较好的 QQ 型聚乙烯醇缩醛漆包线绕制，槽绝缘和相间绝缘用厚 0.25～0.30mm 的聚酯薄膜聚酯纤维复合箔（DMD 或 DMDM），也可加一层 0.05mm 的聚酯薄膜。采用耐油性较好的 1033 环氧酯漆或 1032 三聚氰胺醇酸漆，真空压力浸漆或沉浸。也可改用 831 环氧快干浸渍树脂或少溶剂无溶剂浸渍漆来提高定子绕组的耐潮性能，缩短浸渍和烘干时间，提高产品质量。

为了防止引出电缆外圆和芯线渗油，除用密封圈将电缆引出部位密封外，引出电缆与导线的内接头用环氧胶密封。引出电缆与动力电缆的接头也牢固连接，严格密封，以保证接头的绝缘电阻，提高运行可靠性。

（3）井用干式潜水电机定子绕组的耐水绝缘结构

井用干式潜水电机的定子绕组采用环氧漆包线或聚酯漆包线绕制，槽绝缘和相间绝缘用聚酯薄膜聚酯纤维复合箔（DMD 或 DMDM），浸渍漆采用耐潮性良好的 1033 环氧酯漆，也可采用环氧快干浸渍树脂或少溶剂无溶剂浸渍漆来提高定子绕组的耐潮性能。

对于 F 级绝缘的电机，其定子绕组采用聚酯亚胺漆包线或聚酰胺酰亚胺漆包线绕制，浸渍漆采用相应配套的 F 级聚酯浸渍漆或 F 级环氧浸渍树脂。

引出线与电缆接头的密封也很重要，一般采用环氧树脂浇注或隔离接头来保证接头的密封性能和良好的绝缘性能。

参考文献

[1] 冯欣南主编. 电机学. 北京：机械工业出版社，1999.

[2] 许实章主编. 电机学. 第2版，北京：机械工业出版社，2001.

[3] 孙克军等编著. 中小型交流电机绕组制造工艺与试验方法. 北京：机械工业出版社，2000.

[4] 乔长君编. 三相交流电机绕组布线接线图册. 北京：化学工业出版社，2009.

[5] 王占元等编著. 异步电机绕组的嵌放和修理. 北京：机械工业出版社，2008.

[6] 濮绍文等编. 三相鼠笼式单绕组多速电机. 第2版，机械工业出版社，2000.

[7] 孙克军主编. 交流异步电机修理速成. 北京：中国电力出版社，2004.

化学工业出版社电气类图书推荐

书号	书　名	开本	装订	定价/元
00772	继电器及继电保护装置实用技术手册	16	精装	85
00333	电缆及其附件手册	16	精装	72
04861	电机轴承使用手册	16	假精	58
04615	供用电技术手册	16	精装	88
03630	柴油发电机技术手册	16	精装	98
06669	电气图形符号文字符号便查手册	大 32	平装	45
06935	变配电线路安装技术手册	大 32	平装	35
10561	常用电机绕组检修手册	16	平装	98
10565	实用电工电子查算手册	大 32	平装	59
07881	低压电气控制电路图册	大 32	平装	29
03742	三相交流电机绕组布线接线图册	大 32	平装	35
05678	电机绕组接线图册	横 16	平装	59
05718	电机绕组布线接线彩色图册	大 32	平装	49
08597	中小型电机绕组修理技术数据	大 32	平装	26
07126	电机维修	大 32	平装	15
07436	电机保护器及控制线路	大 32	平装	18
01079	三相异步电机检修技术问答	大 32	平装	18
01362	直流电机检修技术问答	大 32	平装	18
02363	防腐防爆电机检修技术问答	大 32	平装	21
01535	高压交流电机检修技术问答	大 32	平装	18
02363	防爆防腐电机检修技术问答	大 32	平装	23
03224	潜水电泵检修技术问答	大 32	平装	27
03968	牵引电机检修技术问答	大 32	平装	28
03779	变电运行技术问答	大 32	平装	19
02014	工厂实用电气技术问答	大 32	平装	20
02217	电机节能技术问答	大 32	平装	23
03967	变电站综合自动化技术问答	大 32	平装	30
05081	工厂供配电技术问答	大 32	平装	25
07733	实用电工技术问答	大 32	平装	39
00911	图解变压器检修操作技能	16	平装	35
9333	化工设备电气控制电路详解	16	平装	25
9334	工厂电气控制电路实例详解	16	平装	25
04212	低压电机控制电路解析	16	平装	38

续表

书号	书　名	开本	装订	定价/元
04759	工厂常见高压控制电路解析	16	平装	42
08271	低压电机控制电路与实际接线详解	16	平装	38
01696	图解电工操作技能	大32	平装	21
09669	简明电工操作技能手册	大32	平装	48
08051	零起点看图学—电机使用与维护	大32	平装	26
08644	零起点看图学—三相异步电机维修	大32	平装	30
08981	零起点看图学—电气安全	大32	平装	18
09551	零起点看图学—变压器的使用与维修	大32	平装	25
08060	零起点看图学—低压电器的选用与维修	大32	平装	25
02017	电力电缆头制作与故障测寻	大32	平装	22
02383	电力电缆选型与敷设	大32	平装	20
02926	变压器故障诊断与维修	大32	平装	19
03479	电气线路安装及运行维护	大32	平装	30
06528	继电保护装置故障诊断与维修	大32	平装	15
04836	低压电器故障诊断与维修	大32	平装	20
02946	变压器故障诊断与维修	大32	平装	19
09150	电力系统继电保护整定计算原理与算例	B5	平装	29
09682	发电厂及变电站的二次回路与故障分析	B5	平装	29
05400	电力系统远动原理及应用	B5	平装	29
04516	电气作业安全操作指导	大32	平装	24
06194	电气设备的选择与计算	16	平装	29
06573	交流电机控制基础	16	平装	38
08596	实用小型发电设备的使用与维修	大32	平装	29
10785	怎样查找和处理电气故障	大32	平装	28
11454	蓄电池的使用与维护(第二版)	大32	平装	28
11271	住宅装修电气安装要诀	大32	平装	29
11575	智能建筑综合布线设计及应用	16	平装	39
11934	全程图解电工操作技能	16	平装	39

以上图书由**化学工业出版社　电气出版分社**出版。如要以上图书的内容简介和详细目录，或者更多的专业图书信息，请登录 www.cip.com.cn。

地址：北京市东城区青年湖南街13号(100011)

购书咨询：010-64518888

如要出版新著，请与编辑联系。电话：010-64519265　E-mail：gmr9825@163.com